UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE

Paris 6

Habilitation à Diriger des Recherches

Dossier de candidature

présenté par

Edith Perrier, Chargée de Recherches IRD

Modélisation mathématique et informatique de structures naturelles complexes en interaction avec des dynamiques de flux.
Applications hydropédologiques

TABLE DES MATIERES

PREMIERE PARTIE : LA CANDIDATE

I. Résumé de carrière

I.1 CV succinct

Edith Perrier

née en 1957

adresse : centre IRD Ile de France, 32 av. Henri Varagnat, 93143 Bondy Cedex

Tél : + (33) (0) 1 48 02 56 89

courriel : perrier@bondy.ird.fr

Diplômes

1977. Maîtrise de mathématiques, Université de Limoges.

1985. Licence de Littérature Britannique, Université Paris 7

1986. DEA de Biomathématiques, Université Paris 7

1994. Thèse en Sciences de la Terre, Université Paris 6 [1]

Carrière

1979-1987. Professeur de mathématiques en lycée (Education Nationale, Côte d'Ivoire, Paris)

1987-1995. Ingénieur en modélisation hydropédologique (Orstom, Centre de Bondy, 93)

1995-2000. Chargée de recherches en modélisation informatique et mathématique en hydropédologie (Orstom, Centre de Bondy, 93)

2000-2002. Directrice d'une Unité de Recherches en modélisation mathématique et informatique des systèmes complexes naturels et sociaux (IRD[2], ex-Orstom) (Centre de Bondy, 93)

Le tableau 1 (page suivante) fournit une synthèse de mon itinéraire universitaire et professionnel (titres, statuts, affectations, fonctions occupées et type de recherches effectuées). Je le commente en section suivante.

---

[1] Titre de la thèse: Structure des et fonctionnement hydrodynamique des sols, simulations exploratoires. Jury : G.de Marsily, M.Vauclin, R.Lenormand, B. Mandelbrot, R.Alt, G.Pedro, C.Mullon, M.Rieu.

[2] Institut de recherche pour le développement, créé après restructuration de l'Orstom, EPST de l'état français. Institut de recherche scientifique et technique, autrefois pour les territoires français d'outre-mer, puis pour les pays dits en voie de développement.

CV Edith Perrier, née en1957

Dates	Titres	Statut	Affectation	Fonction	Recherche
1973	**Bac C, Mention Bien**	**Pré-enseignante fonctionnaire (Normale, IPES)**	**Ecole Normale Instit. Corrèze**	**Etudes**	
1974			**Classes préparatoires Maths Physique Limoges**		
1975					
1976			**Université Maths Limoges**		
1977	**Maîtrise Mathématiques**				
1978	**CAPES Mathématiques**				
1979		**Fonct. Ministère.Coopération**	**Lycée d'Adzope. Côte d'Ivoire**	**Enseignement Maths.**	
1980					
1981		**Prof.certifiée, Fonctionnaire Education Nationale**	**Académie de Paris** / **Université P7**		
1982					
1983	**Licence Littérat. Britannique Paris7**				
1984 *1er enfant*					
1985	**DEA de Biomathématiques Paris7, Mention Bien**	**Prof.Fonct.EN mi-temps** / **Stag. DEA accueil CNRS**	**Collège de Fr Lab.Neurobio**	**Ens.Maths** / **Particip.Prog. Métabolisme**	**Modélisation/Trait. signal physiologie**
1986					
1987 *2ème enfant*		**Fonct. Détachée EN -> Orstom**	**Centre Orstom Bondy, UR 2B**	**Création/ Anim. d'un Atelier de simulation numérique**	**Soutien à divers programmes de rech. en hydropédologie**
1988 *3ème enfant*					
1989		**IE2 Orstom (concours externe)**	**Centre Orstom Bondy, UR2B, laboratoire d'hydrophysique et LIA**	**Animation d'un pôle de soutien aux recherches en hydrophysique des sols au sein du Laboratoire d'Informatique Appliquée**	**Simulation numérique hydrophysique des sols**
1990					
1991					**Thèse : Structure géométrique et Fonctionnement hydrodynamique des sols, simulations exploratoires**
1992	**Thèse en Sciences de la terre et hydrologie, Paris 6, Mention Tbien et Félicit.**				
1993					
1994					
1995		**CR1 Orstom (concours interne)**	**Centre Orstom Bondy, UR24 Savanes, LIA, associée UMR Sisyphe Paris 6**	**Chargée de recherches en méthodes de modélisation informatique et mathématiques en hydropédologie**	**Définition et encadrement de plusieurs sujets de recherches en modélisation informatique et hydrologique** **+ modélisation PSF**
1996					
1997					
1998					
1999					
2000				**Création/ Direction d'une UR Modélisation mathématique et informatique de systèmes complexes naturels et sociaux**	**Modélisation hydropédologie et Simulation organisations géométriques vs dynamiques environnementales**
2001		**CR1, DU UR Geodes**	**Centre IRD Ile de France, UR079 Geodes**		
2002	**Préparation HdR, P6**	**Candidate DR2....**			

I.2 Mon itinéraire

1973-1987. Etudiante en maths-physique, puis en mathématiques pures, professeur de mathématiques en lycée pendant huit ans, j'ai, en parallèle avec mes activités d'enseignement, suivi les enseignements du DEA de Biomathématiques de Paris 7 en 1985-86. Je n'ai commencé mes premières activités de recherches qu'en 1986, au Collège de France, lors de mon stage de DEA, puis, toujours à mi-temps, lors d'une prolongation en accueil interrompu par ma prise de fonctions à l'Orstom en 1987.

1987-1991. Recrutée comme ingénieur par une Unité de Recherches en hydropédologie de l'Orstom, j'avais pour mission de créer et d'animer un atelier de traitement de données et de simulation numérique au service des chercheurs de cette UR. J'ai ensuite participé à la création de deux laboratoires de l'Orstom à Bondy (Laboratoire d'Hydrophysique des Sols -LHS- et Laboratoire d'Informatique Appliquée –LIA-) au sein desquels j'ai conduit des activités d'ingénierie informatique et de calcul numérique. Pour répondre aux besoins des recherches de laboratoire et de terrain, une de mes activités principales consistait à développer des outils de simulation à partir de modèles classiques d'écoulements d'eau dans les sols non saturés.

1991-1994. Les modèles classiques étant jugés insuffisants pour la compréhension du fonctionnement des sols structurés et des échantillons non remaniés, à plus forte raison pour l'analyse des sols dont la structure se modifie en fonction de la teneur en eau, j'ai alors proposé, dès 1991, un travail original de modélisation des structures de sols et de simulation de leur comportement hydrique, ce qui a donné lieu à une soutenance de thèse de doctorat à l'université Paris 6 en 1994, et à l'attribution d'un prix par l'Académie d'Agriculture.

1995-1999. Détachée dans le corps des chercheurs en 1995, en hydropédologie, membre à part entière de l'UR24 Savanes de l'Orstom, membre associée de l'UMR Sisyphe de l'université Paris 6, accueillie à temps plein au LIA, j'ai assuré jusqu'à 1999 une fonction de chercheuse senior : définition et montage de projets de recherche en collaboration; recherches propres sur le modèle PSF de structure de milieux poreux; publications et communications; encadrement d'étudiants sur des recherches méthodologiques en hydropédologie; animation de la vie scientifique du laboratoire dans un environnement de modélisation multidisciplinaire.

1999-2002. Durant la période 1999-2000 de réorganisation de l'Orstom, devenu l'IRD, j'ai proposé un projet d'Unité de Recherches en modélisation des systèmes complexes et j'ai mis en place l'UR Geodes[3] durant l'année précédant sa création officielle en janvier 2001. C'est ainsi que, depuis bientôt deux ans, je continue mes activités propres de modélisation de systèmes hydropédologiques, mais en les intégrant dans un cadre plus général, celui des recherches en Mathématiques et Informatique Appliquées à la modélisation des systèmes complexes naturels et sociaux menées par l'équipe que je dirige.

I.3 Activités de recherche scientifique

Je décrirai et analyserai mes activités de recherche dans la deuxième partie de ce mémoire. Mis à part mes premiers travaux en modélisation physiologique, je parlerai surtout :

De simulation des transferts hydriques dans des profils de sols rigides ou déformables suivant des modèles équationnels de circulation des fluides dans un milieu continu

[3] UR 079, **Géométrie des Espaces Organisés, Dynamiques environnementales et Simulations**

De modélisation géométrique de la structure des sols à l'échelle "microscopique", i.e. de l'assemblage discontinu des vides et des solides au sein d'une organisation poreuse multi-échelle; et de la recherche de liens déteministes entre caractéristiques structurales et caractéristiques hydrodynamiques

De la modélisation des processus d'infiltration et de ruissellement à l'échelle "mésoscopique" où l'on décrit la surface d'une parcelle de sol ou d'un bassin versant donné.

Enfin, plus généralement, de recherche de méthodes "génériques" de simulation de dynamiques spatialisées

La liste des publications et communications afférentes est donnée à la fin de cette première partie du mémoire, et une sélection de textes complets d'articles fait l'objet de la troisième partie.

I.4 Encadrement d'étudiants

J'ai participé, de façon informelle, à la formation de nombreux étudiants de différents niveaux : DUTS, Ecoles d'ingénieurs, stagiaires divers, le plus souvent en soutien à mes collègues encadreurs affectés outre-mer (exemple : soutien des thésards L.Mane, B.Pango, C.Pleuvret, A.Mapangui) ou au titre de l'animation du LIA (qui a formé de très nombreux étudiants envoyés en accueil plus ou moins long dans nos locaux par d'autres équipes Orstom). De façon officielle, j'ai effectué les encadrements et co-encadrements suivants :

<u>Stages DEA / DESS :</u>

Ch.Leclerc, *Architecture objet d'un logiciel scientifique de simulation de transferts hydriques*, DESS Informatique, Université de Nancy, 1996, recruté comme Ingénieur par la société Ilog.

Ch.Solignac, *Simulations multi-agents de processus physiques : communications entre des entités élémentaires et un environnement hétérogène*. DEA informatique IARFA, Université Paris 6, 1996, recruté dans une société de services informatiques.

D.Servat, *Création dynamique de groupes d'agents dans des simulations multi-agents : application à la création d'objets intermédiaires dans la simulation de processus de ruissellement*. DEA informatique IARFA, Université Paris 6, 1997, recruté comme chercheur au CEA.

<u>Comités de pilotage de thèse :</u>

IRD / Univ. Nancy, P.Garnier, 1996 (*modélisation des transferts hydriques dans un sol déformable*), recrutée comme chercheuse à l'INRA

INRA Rennes, Univ Rennes. Jérome Molénat, 1995-98 (*modélisation des transferts d'eau et de nitrates dans un système hydropédologique armoricain*), recruté comme chercheur à l'INRA

IRD / Univ. Montréal JP.Senghor, 1997-99 (*couplage de modèles numériques et qualitatifs dans un système irrigué au Sénégal*), interruption de thèse IRD en 99, travaille en entreprise au Sénégal.

IRD / Univ. Paris 9, E.Fianyo, 1997-2001 (*couplage de modèles à l'aide d'agents : le système OSIRIS*), recrutée comme ingénieur de recherche à l'IRD

INRA Rennes, Univ. Rennes Guenola Perez, 2001- (*fonctionnement hydrodynamique de la macroporosité d'origine lombricienne dans les sols*), en cours

INRA Laon / Univ Orléans, Anatja Samouélian, 2001- (*modélisation et suivi de la structure des sols fissurés par mesure de la résistivité électrique des sols*), en cours

<u>Co-encadrements de thèses :</u>

Univ Paris 6 Hydrologie / IRD Vanessa Teles (Dir. G.de Marsily)

Construction de réservoirs aquifères alluviaux par modèle génétique de mise en place des alluvions, Thèse en hydrologie, Paris 6, 1999, actuellement post-doc en hydrologie, MIT Boston (USA)

IRD / Univ Paris6 Informatique David Servat (Dir. A.Drogoul)

Modélisation de dynamiques de flux par agents. Application aux processus de ruissellement, infiltration et érosion, Thèse en informatique, Paris 6, Novembre 2000, recruté comme chercheur au CEA

IRD / Univ Paris 6 Hydrologie Joël Léonard (Dir. G.de Marsily)

Interaction entre le ruissellement et les macropores créés par les termites dans le cas d'un sol encroûté au Sahel. Etude expérimentale et modélisation, Thèse en hydrologie, Paris 6, Novembre 2000, recruté comme chercheur à l'INRA Laon

IRD / Univ. Orsay Informatique Jean-François Delerue (Dir. O.Monga)

Segmentation 3D, application à l'extraction de réseaux de pores et à la caractérisation hydrodynamique des sols. Thèse en informatique, J.F. Delerue, Université d'Orsay, Juillet 2001, actuellement post-doc Université KU Leuven (Belgique)[4].

Autre encadrement :

Après avoir encadré le DESS de Ch.Leclerc, j'ai monté à son nom un dossier de recrutement pour une année de recrutement d'un volontaire du service national au ministère de l'environnement, il a pu continuer le développement du logiciel de simulation hydrodynamique Ecoul dans l'environnement de développement d'applications vendu par la société Ilog, et il a été recruté par cette entreprise pour le jour même de sa fin de contrat à l'Orstom.

I.5 Autres activités liées à la recherche

Formation

Organisations de formations Orstom d'ingénieurs et de chercheurs à la programmation (enseignement des nouveaux concepts de programmation Xwindows et Xview, 1992).

Co-organisation des Ecoles d'été Orstom sur la modélisation des systèmes complexes à Orléans (2 semaines, 1996, idem 1997) et enseignements sur le chaos déterministe et les fractales.

Enseignement lors des formations dispensées par l'équipe Green du CIRAD sur la modélisation multi-agents (1 demi-journée annuelle depuis 5 ans)

Conférence invitée lors des journées de formation MIA CIRAD (Cours d'introduction aux fractales et exemples de modélisation, 1999).

Participation aux Journées Recherche et Grandes Ecoles (ENGREF, Mars 2000)

Enseignement au DEA national de science du sol (4heures annuelles depuis 1995 sur la modélisation de structures de sols et leur caractérisation hydrodynamique).

Cours et TP sur la modélisation hydropédologique en maîtrise d'hydrologie à Paris 6 (6 heures en 2002).

---

[4] sous convention de collaboration avec l'UR Geodes

Evaluation

Scientifique :

« Reviews » d'articles scientifiques pour les journaux WRR, EJSS, Geoderma (une quinzaine)

Evaluation de projets scientifiques (Ex : région Languedoc Roussillon, Fondation Israël, British Research Council)

Universitaire :

Membre des jurys de DEA / DESS de C.Leclerc, Ch.Solignac, D.Servat.

Invitée[5] aux jurys de thèse de : V.Teles (1999, hydrologie Univ.P6), D.Servat (2000, informatique Univ.P6), J.Leonard (2000, hydrologie Univ.P6), J.F.Delerue (2001, informatique Univ.P11), A.J.Schipman (2002, hydrologie Univ.Grenoble), jury d'HdR C. Bertelle (2002, informatique Univ.Le Havre)

Professionnelle :

Participation à des jurys de concours ITA de l'Orstom.

Membre nommée des CAP d'ingénieurs et de techniciens de l'IRD.

Organisation de colloques

Co-organisation des colloques Seminfor (2ème et 4ème Séminaires Informatiques de l'Orstom Séminfor2, La modélisation, aspects pratiques et méthodologiques, Montpellier, Sept. 1988, Séminfor4, Le transfert d'échelle, Brest, Sept. 1990, audience nationale)

Organisation d'un colloque sur la structure des sols, le transport de l'eau et des solutés à Bondy en 2001[6] : International Conference on Soil Structure, Water and Solute Transport, Bondy 8-10 Oct.2001, coordination avec les autres UR co-organisatrices, Edition des actes du colloque (en interne, les résumés) et collaboration avec l'éditeur du journal européen EJSS pour la diffusion des participations majeures sous forme d'un numéro spécial, sous presse.

Administration de la recherche

Mes responsabilités se sont toutes exercées dans le cadre du même EPST (IRD ex-Orstom): animation d'un atelier pour une équipe de chercheurs (UR2B), organisation de la collaboration entre diverses équipes de terrain et de modélisation (UR Savanes, LHS, LIA), puis animation scientifique d'un laboratoire (LIA), et enfin création d'une unité de recherches (UR Geodes) et direction de cette unité. Mis à part quelques devoirs institutionnels (participation à des jurys de recrutements, membre nommée des CAP d'ingénieurs, participation à des réunions et débats variés au sein de l'Institut), l'essentiel de mes activités d'administration de la recherche se situe actuellement au niveau de la direction de l'UR, qui comprend 13 personnes[7] à temps plein en comptant délégations et accueils, plus un flot annuel de 10 à 15 thésards / stagiaires DEA (Voir http://www.bondy.ird.fr/geodes).

Cela consiste en :

---

[5] et plusieurs invitations comme rapporteurs déclinées car pas habilitée...

[6] dédié à la mémoire de notre collègue Michel Rieu

[7] **G.Pichon**, DR IRD (Epidémio-parasitologie quantitative, Biomathématiques), **J.P.Gouteux** CR IRD (modélisation éco-épidémiologique), **M. Piron**, IE IRD (Maths, Analyse de données, Sciences sociales, Géographie) ; **J.P. Treuil**, IR IRD (Informatique, Maths-Physique) ; **C. Mullon**, DR IRD (Mathématiques, Statistiques, Sciences de la complexité) ; **J-F Delerue** (CDD Informaticien modélisateur, hydrodynamique et structure des sols) ; **O. Arino**, Prof. Mathématiques (Maths Appli., Dynamique des pop. marines), accueil plein IRD ; **Ch. Cambier**, MdC. Info. P6, membre UR, modélisation multi-agents, accueil IRD Sénégal ; **Alain Cardon**, Prof. Informatique, Systèmes Multi-agents, associé P6, délégation IRD ; **C. Bernard**, AI IRD (Valorisation scientifique) ; **Kathy Baumont** (secrétariat) ; **Stéphanie Carrière** (CR Ecologiste, accueil UR IRD)

La gestion d'une équipe :

demande et gestion budgétaires, supervision des tâches de secrétariat et d'aide technique à la recherche, répartition des équipements et des bureaux, gestion du personnel, en France et en expatriation à l'étranger, réunion administrative hebdomadaire en interne, relations avec les autres URs de l'IRD, la Direction du Centre, les Départements Scientifiques, le Département Soutien et Formation aux Communautés du Sud (bourses de thèses IRD et accueils), la Direction du Personnel, la Direction Générale (ex : réunions annuelles des DU), etc.

L'animation scientifique d'une équipe :

organisation depuis 1999 de séminaires tous les Mardi matin et animation de séances de travail collectif.

La structuration du partenariat de l'UR, dans la lignée de l'ouverture de l'IRD vers la communauté nationale ou européenne avec :

EA d'Ecoles doctorales Paris 6

Convention d'association officielle avec l'équipe Oasis de l'UMR LIP6

Conventions d'associations ponctuelles, Ex : KU Leuven ou accueils d'universitaires français et étrangers de courte ou longue durée

Collaborations avec des équipes d'autres instituts de recherche (Ex : groupe de travail MIMOSA multi-organismes Cirad, Inra, Cemagref, Cnrs, Universités, sur un projet de plate-forme de simulations, 2001-2002)

Collaboration avec les autres UR (montage de projets transversaux)

Création en 2002 d'une « jeune équipe associée » à Geodes au Maroc, soutenue par l'IRD, sur le thème « Modélisation mathématique et informatique des phénomènes naturels et sociaux », au sein du LPSSD (Laboratoire des Processus Stochastiques et des Systèmes Dynamiques de l'Université de Marrakech)

La recherche de financements extérieurs complémentaires, et la réponse à divers appels d'offres, et en partenariat (voir paragraphe suivant)

Montage de projets

Au niveau de toute l'équipe, et au titre de l'engagement de l'UR Geodes :

2000-2002. plusieurs projets de recherches : En modélisation de la dynamique de populations marines, coordination O.Arino, UR Geodes : programmes de collaborations bilatéraux MAE (France-Maroc et France-Algérie), projet PNEC IRD-IFREMER-UPPA « Hiérarchisation de processus et transferts d'échelles dans le milieu pélagique marin par une approche de modélisation dynamique ». Coordination C.Mullon, UR Geodes, soumission du projet « De l'analyse de viabilité des écosystèmes marins à la définition d'indicateurs pour l'aménagement des pêcheries », ACI Ecologie Quantitative.

Projet MAE CORUS (collaboration multilatérale avec des pays de la ZSP) « Modèles et Méthodes Mathématiques et Informatiques en Dynamique de Populations », France Maghreb Afrique du Sud, coordination Geodes-CISD soumis en 2002

Représentation de l'UR Geodes au sein du groupe de travail MIMOSA (groupe français multi-organismes IRD, CIRAD, CNRS, CEMAGREF, LIP6, LIRMM, LIL, etc., actuellement financé actuellement sur fonds répartis et GDR-I3). But du consortium : développement d'une plate-forme de simulation multi-agents et distribuée regroupant des outils de modélisation informatique des systèmes complexes naturels et sociaux

Participation à plusieurs déclarations d'intérêt pour la constitution de réseaux d'excellence européens en 2002, notamment sur la recherche de méthodes et d'outils de simulation distribuée des systèmes complexes, coordination LISC G.Deffuant, en 2002

A mon niveau « personnel », et au titre de l'UR depuis 2000 :

1994-96. Participation au programme Alliance franco-britannique CNRS-CPB/SRI (Silsoe Research Institute) /IRD coordination française F.Bartoli (CNRS), modélisation fractale de la structure des sols

1996-1999. Coordination d'un projet pilote du LIAMA (laboratoire franco-chinois en Informatique, Automatique et Mathématiques Appliquées de Pékin) : Analyse d'image tridimensionnelles et structure des sols (participation IRD, IOA Pékin, Science du sol Nankin, INRA Rennes, ENS).

1998. Coordination du projet PNSE Modélisation de la structure des sols et fonctionnement hydrodynamique (participation IRD/ENS/SRI)

2001-2003. Participation au projet Européen Flocods sur les risques d'inondations sur le Fleuve Rouge, coordination D. N'guyen (Univ.Caen), suivi des états et usages du sol par imagerie pour la modélisation hydrologique.

2003-2004. Soumission en 2002 d'un projet MAE Alliance franco-britannique (IRD/SRI/INRA Laon) : Quantification et modélisation de la structure et du fonctionnement hydrodynamique des sols. Caractérisation des évolutions en milieu cultivé.

2003. Soumission en 2002 d'un projet MAE –échanges bilatéraux France Chine (IRD UR ECU et GEODES, INRA LAON / Institut de science du sol de Nankin), modélisation érosion et hydrologie.

II.Publications

II.1 Publications dans des revues à comité de lecture

[1] [02-0] D.Servat, J.Leonard, E.Perrier, 2002. A new, particle-based approach to simulate overland flows, *Water Resources Research*, (révision en cours)

[2] [02-1] N.Bird, E.Perrier, 2002. The PSF model and soil density scaling (*European Journal of Soil Science, accepté*)

[3] [02-2] J.F. Delerue, E.Perrier, A. Timmerman, R.Swennen, 2002, 3D soil image characterization, application to hydraulic properties computation, *Journal of the London geology society (accepté)*

[4] [02-3] E.Perrier, N.Bird, 2002. Modelling soil fragmentation: the PSF approach, *Soil and Tillage Research, 64, pp 91-99.*

[5] [02-4] E.Perrier, P.Garnier, Ch.Leclerc, 2002. ECOUL : an interactive computer tool to study hydraulic behavior of swelling and rigid soils *Computers&Geosciences, 28(9), pp.1107-1118*

[6] [02-5] J.F.Delerue, E.Perrier, 2002. DXSoil, a library for image analysis in soil science *Computers&Geosciences, 28(9), pp. 1041-1050*

[7] [01-1] J. Léonard, E. Perrier, G. de Marsily, 2001. A model for the simulation of the influence of a spatial distribution of large macropores on runoff and infiltration, *Water Resources Research, Vol. 37, No. 12, p. 3217-3226*

[8] [01-2] V. Teles, J.P. Bravard, G. de Marsily, E.Perrier, 2001. Modelling of the construction of the Rhône alluvial plain since 15,000 years BP - *IAS, Sedimentology, 48, pp. 1209-1224*

[9] [00-1] N. Bird, E.Perrier, M. Rieu, 2000. The water retention curve for a model of soil structure with Pore and Solid Fractal distributions. *European Journal of Soil Science EJSS 55(1), pp55-65.*

[10] [99-1] E.Perrier, N. Bird, M.Rieu, 1999. Generalizing the fractal model of soil structure : the PSF approach. *Geoderma 88 pp.137-164*

[11] [99-2] J.F. Delerue, E.Perrier, Z. Yu, B.Velde, 1999. New methods in 3D image analysis and their application to the measurement of pore size distributions in soils, *Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 24, No. 7, Part A.*

[12] [98-1] V.Teles, G.de Marsily, E.Perrier, 1998. Sur une nouvelle approche de modélisation de la mise en place des sédiments dans une plaine alluviale pour en représenter l'hétérogénéité. *Comptes Rendus Académie des Sciences, CRAS 327, pp.597-606.*

[13] [98-2] P.Garnier, E.Perrier, G.Bellier, M.Rieu, 1998. Modélisation du transfert de l'eau dans des échantillons de sols non saturés déformables, *Bull. Soc. géol.Fr., 169(4), pp.589-593.*

[14] [98-3] E.Perrier, M.Rieu, G.Sposito, G.de Marsily,1998. Comment on « An improved fractal equation for the soil water retention curve » by E.Perfect,N.B.Laughin,B.D.Kay, and G.C.Topp, WRR 32(2),1996, *Water Resources Research, WRR, Vol.34, no 4, pp.931-932.*

[15] [97-1] P.Garnier, E.Perrier, A.J.Angulo, Ph. Baveye 1997. Numerical model of 3-dimensional anisotropic deformation and water flow in swelling soil, *Soil Science, 162(6), pp.410-420*

[16] [96-1] E.Perrier, M.Rieu, G.Sposito, G.de Marsily, 1996. Models of the Water Retention Curve for soils with a fractal pore-size distribution, *Water Resources Research, Vol.32, 10, pp.3025-3031.*

[17] [95-1] E.Perrier, C.Mullon, M.Rieu, et G.de Marsily, 1995. Computer construction of fractal soil structures. Simulation of their hydraulic and shrinkage properties, *Water Resources Research, vol31,no.12, pp.2927-2943.*

[18] [94-1] M.Rieu, E.Perrier, 1994. Modélisation fractale de la structure des sols. *Comptes Rendus Académie Agriculture Vol.80,n°6, pp.21-39.*

[19] [91-1] P.Even, E.Perrier, J.L.Aucouturier, S.Nicolaïdis, 1991. Utilisation of the method of Kalman filtering for the obtention of a measure of the background metabolism in a rat *Physiology & Behavior. Vol 49, pp.177-187.*

II.2 Ouvrages et chapitres d'ouvrages

[20] [02-6] E. Perrier, N. Bird, 2002. The PSF model of soil structure : a multiscale approach, *In : Scaling methods in soil physics, Eds. Radcliffe/Selim/Pachepshy, CRC Press (sous presse).*

[21] [01-3] J.P.Treuil, Ch.Mullon, E.Perrier, M.Piron, 2001. Simulation multi-agents de dynamiques spatialisées, *In : Modèles en Analyse Spatiale, eds. Sanders et al., Ed Hermès, pp219-252*

[22] [98-4] M.Rieu, E.Perrier, 1998. Models of fragmented and aggregated soils, *In "Fractals in soil science", (Baveye et al.Eds), CRC Press LLC, pp169-202*

[23] [95-2] E.Perrier, 1995. Structure géométrique et comportement hydrique des sols. Simulations exploratoires. *Thèse Université Paris VI 1994, 250 pages. Ed.Orstom Collection Etudes et Theses 1995*

II.3 Communications à des colloques

Articles sélectionnés par un comité de lecture et Actes publiés

[24] [00-02] J.Leonard, E.Perrier, J.L.Rajot, 2000. Biological macropores effect on runoff andinfiltration: a combined experimental and modelling approach. *Agriculture, Ecosystems & Environment, pp. special issue GCTE Focus 3 conference: Soil Erosion, Biology and Organic Matter. September 23-24, Reading, UK.*

[25] [98-5] D.Servat, E.Perrier, J.P.Treuil, A.Drogoul, 1998. Towards Virtual Experiment Laboratories: How Multi-Agent Simulations Can Cope with Multiple Scales of Analysis and Viewpoints. *J.-C. Heudin (Ed.): Proceedings of the Virtual Worlds First International Conference, VW'98, Paris, France, July 1998, LNAI series, volume 1434, pp. Springer-Verlag, Berlin.*

[26] [98-6] E.Fianyo, J.P.Treuil, E.Perrier, Y.Demazeau, 1998. Multi-agent architecture integrating heterogeneous models of dynamical processes: the representation of time, *Multi-agent systems and Agent-Based Simulation, Paris La Villette Juillet 98, Sichman, Conte and Gilbert (eds) LNAI series, volume 1534, pp.226-236, Springer-Verlag Berlin.*

[27] [98-7] D.Servat, E.Perrier, J.P.Treuil, A.Drogoul, 1998. When agents emerge from agents : introducing multi-scale viewpoints in multi-agent simulations. *Multi-agent systems and Agent-Based Simulation, Paris La Villette Juillet 98, Sichman, Conte and Gilbert (eds) LNAI series, volume 1534, pp. Springer-Verlag Berlin.*

[28] [98-8] E. Fianyo, J.P. Senghor, E.Perrier, P. Boivin, J.P. Treuil, 1998. Une démarche informatique pour simuler le fonctionnement hydro-salin d'unsystème irrigué au nord Sénégal. *In: Actes du 4eme Colloque Africain sur la Recherche en Informatique - CARI'98.Presses Universitaires de Dakar, UCAD, pp.637-647.*

[29] [97-2] J.P.Treuil, E.Perrier, Ch.Cambier, 1997. Directions pour une approche multi-agents de la simulation de processus physiques spatialisés, *communication aux journées d'Intelligence Artificielle et Systèmes Multi-agents, JFIADSMA'97, Ed.Hermès, pp.221-228.*

[30] [96-2] E.Perrier, Ch.Cambier, 1996. Une approche multi-agents pour simuler les interactions entre acteurs hétérogènes de l'infiltration et du ruissellement d'eau sur une surface de sol*Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement,, Edition Elsevier (Blasco eds.) pp.233-242.*

[31] [95-3] E.Perrier, J.P.Treuil, C. Cambier, M.Rieu, 1995. Représentation informatique d'un ensemble d'objets spatiaux structuré et déformable. A partir d'un exemple de structures microscopiques de sol gonflants. *Communication Colloque INRA, Etudes des phénomènes spatiaux, La Rochelle 6-8 Décembre 1995. (Ed.INRA) pp.215-226*

Articles publiés dans des Actes simples

[32] [99-3] J.F. Delerue, E.Perrier, A.Timmerman, M.Rieu, 1999. New computer tools to quantify 3D porous structures in relation with hydraulic properties. *Actes du colloque Modelling of transport processes in soils, 24-26 Novembre 1999, Leuven, J.Feyen & K.Wiyo.Eds, Wageningen Pers, The Netherlands, pp.153-163.*

[33] [99-4] D.Servat, J.Leonard, E.Perrier, J.P.Treuil, 1999. The Rivage Project : a new approach for simulating runoff dynamics. *Actes du colloque Modelling of transport processes in soils, 24-26 Novembre 1999, Leuven, J.Feyen & K.Wiyo.Eds, Wageningen Pers, The Netherlands, pp.592-601.*

[34] [99-5] J.Leonard, M.Esteves, E.Perrier, G.de Marsily 1999. A spatialized overland flow approach for modelling large macropores influence on infiltration. *Actes du colloque Modelling of transport processes in soils, 24-26 Novembre 1999, Leuven, J.Feyen & K.Wiyo.Eds, Wageningen Pers, The Netherlands, pp.313-322.*

[35] [97-3] E.Perrier, P.Garnier, Ch.Leclerc, 1997. Profile-scale simulation of water flow : a software package to visualize and to estimate soil hydraulic properties effects, poster and demonstration, *International Workshop on Characterization and measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media, Riverside, USA, 22-24 Oct.1997, Eds Van Genuchten et al, pp.349-354.*

[36] [97-4] E.Perrier, M.Rieu, G.Sposito, G. de Marsily, 1997. Pore-scale soil structure models and associated hydraulic properties (I.A computer simulator of geometric models of soil structure, II.Models of the water retention curve for soils with a fractal pore size distribution), posters, *International Workshop on Characterization and measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media, Riverside, USA, 22-24 Oct.1997, Eds Van Genuchten et al. pp.93-100.*

[37] [96-3] V.Gomendy, F.Bartoli, B.Pechard-Presson, H.Vivier, V.Petit, N.Bird, S.Niquet, E.Perrier, J.J. Royer, T.Leviandier, 1996. Fractals, théorie de la percolation et structures des sols: une approche unifiée pour la modélisation des courbes de rétention d'eau et des transferts? *Journées du programme Environnement, Vie et Sociétés, Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement, Cité des Sciences et de l'industrie, Paris, 15-17 Janvier 1996*

[38] [95-4] E.Perrier, 1995. A simulator to generate virtual soil structures and to investigate their hydraulic behavior, Communication *IMACS/IFAC International Symposium on*

Mathematical Modeling and Simulation in Agriculture&Bio-industries, M²SABI'95, Bruxelles, 9-12 Mai 1995. Actes du colloque, Volume III,V.C.4.pp1-7

[39] [92-1] E.Perrier, C.Mullon, M.Rieu, et G.de Marsily, 1992. An object-oriented computer construction of deforming fractal soil structures. Determination of their water properties. Poster Colloque*"Porous and fractured media. Transport and behaviour". IPFL (Institut Fédéral Polytechnique de Lausanne), Suisse, 5-9 Oct 1992*, et *Actes du colloques pp 255-272.*

[40] [91-2] E.Perrier, C. Mullon, 1991. Simulation du comportement hydrique du sol: d'un milieu poreux continu à une structure fractale. Demonstration *Colloque "L'informatique scientifique dans l'enseignement de la biologie et de la géologie au lycée". ENS, Paris, Juin 1991. Ed. Technologies nouvelles et Education, INRP, pp 91-96*

[41] [90-1] E.Perrier, 1990. Modélisation du fonctionnement hydrique des sols. Passage de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique. Communication *Colloque Séminfor 4:"Le transfert d'échelle" Brest 11-13 Sept.90. Ed.Orstom, pp 113-132.*

Communications orales et posters.

[42] [02-7] J.F. Delerue, E.Perrier, N.Bird, 2002. Multiscale and fractal modeling of porous media : inferred links between soil structural and hydraulic properties, *communication, EGS (European Geophysical Society), Nice 21-26 Avril 2002.*

[43] [02-8] J.F. Delerue, E. Perrier, 2002. Computer methods to measure soil structure and hydraulic indicators at the pore scale, 2002, *poster, EGS, Nice 21-26 Avril 2002.*

[44] [02-9] D. Servat, E.Perrier, J.Leonard, 2002. Computational agents for flows: waterballs, water paths and ponds, *poster, EGS, Nice 21-26 Avril 2002.*

[45] [02-10] V. Teles, G.de Marsily, F.Delay, E.Perrier, 2002. Preliminary groundwater simulations to compare different reconstruction methods of 3-D alluvial heterogeneity, *communication, EGS, Nice 21-26 Avril 2002.*

[46] [02-11] V.Teles, E.Perrier, F.Delay, G.de Marsily, 2002. Alluvial aquifer heterogeneity representation by a new genetic/stochastic 3-D sedimentation model : comparison of groundwater flow simulations by such a representation with that of a geostatistical approach. *International symposium Bridging the gap between measurements and modeling in heterogeneous media, Berkeley, USA, Mars 2002 (proceedings 4pp)*

[47] [01-4] J.F.Delerue, E.Perrier, N.Bird, 2001. Computer construction of 3D virtual soil structures according to the PSF model and simulation of their hydraulic properties. *Poster, International Conference on Basic Sciences and its Applications Granma, Cuba. 17-20 Octobre 2001.*

[48] [01-6] E.Perrier, N.Bird 2001. The PSF model of soil structure : a multiscale approach. *Symposium Bridging scale in soil physics, ASA-CASSA-SSA Annual meetings, 21-25 Octobre 2001, Charlotte, North Carolina, USA (Conférence invitée American Society of Agronomy).*

[49] [01-7] N.Bird, E.Perrier, 2001. Pore-scale modelling - the PSF approach, *Poster Environmental Flows Conference, Dundee, Scotland, 26-28 Mars 2001.*

[50] [98-9] V. Teles, G.de Marsily, E.Perrier, 1998. A new approach to sediment erosion and deposition in an alluvial system. *Communication EGS 1998*

[51] [98-10] J.F. Delerue, Z. Yu, S. de Ma, E.Perrier, 1998. A new method of skeleton extraction and application for 3D soil images. *Poster EGS 1998*

[52] [98-11] E.Perrier, J.P. Treuil, C.Mullon, N. Ferrand, 1998. Simulations distribuées versus simulations multi-agents. phénomènes physiques. *Conférence invitée au colloque SMAGET,LISC, Clermont-Ferrand Oct. 98.*

[53] [97-5] Ch. Cambier, E.Perrier, J.P.Treuil, Ph. Preux, 1997. Action physique et espace géométrique. Contribution à une réflexion sur l'utilisation des modèles multi-agents pour la simulation de processus physiques. Application Rivage, poster, *Actes des Journées Françaises d'Intelligence Artificielle Distribuée et systèmes multi-agents 1997, Ed.Hermès,p.89.*

[54] [94-2] E.Perrier, 1994. A simulator of fractal soil structures to explore their water properties, Communication, *EGS, session Non Linear Processes in geophysics, Grenoble, 25-29 Avril 94. Annales Geophysicae, SuppII to Vol12, p.483.*

[55] [94-3] E.Perrier, 1994. "Modeling the retention curve in fractal soil structures" et "A simulator of fractal soil structures to explore their water properties". Posters *Gordon Conférence sur les fractales, San Miniatio, Italie, 2-6 Mai 1994.*

[56] [93-1] E.Perrier, M.Rieu, G.Sposito, C.Fuentes, 1993. Fractal structures and soil water properties. Communication *IAMAP.IAHS' 93,Yokohama, Japon, 12-23 Juillet 1993.*

[57] [93-2] E.Perrier, M.Rieu, 1993. Modèles et simulations de structures de sol. Conséquences hydrodynamiques. *Communication Journées de l'Association Française pour l'Etude des Sols. Paris 8 Avril 1993.*

II.4 Divers : conférences, diffusion logicielle, etc.

Séminaires et conférences

[58] [96-4] E.Perrier, 1996. Simulations multi-agents et modélisation en hydrologie, *Conférence invitée Journée PNRH Strasbourg 23-24 Mai1996.*

[59] E.Perrier, 2002, A multiscale percolation model applied to porous media : how to infer links between hydraulic and structural scaling properties, *Document powerpoint, Cape Town University, Séminaire du Dept. of Applied Mathematics, Capetown, 21 Fevrier 2002.*

[60] E.Perrier, 2000. Fractal models in soil science. *Conférence invitée à l'ETH de Zurich.*

[61] E.Perrier, J.P.Treuil, 1999. Modélisation de dynamiques spatialisées par approches particulaires, multi-agents ou individus-centrées. Dynamiques hydrologiques et dynamiques de populations. *Séminaire PSIG- P.A.R.I.S, Dynamiques spatiales : méthodes de modélisation et de simulation" 27 Mai 1999, Université Paris I.*

[62] E.Perrier, 1999. Intérêt des approches particulaires en hydrologie-géologie *Séminaire Simulation individus-centrées. 17 Mai 1999, Laboratoire BIOMATHS-BIOSTATS. Univers. Paris 7.*

[63] P. Boivin, E.Perrier, 1998. Approche du fonctionnement des systèmes irrigués à l'aide d'un simulateur multi agents. Exemple du secteur Ngalenka au Sénégal et de l'analyse de l'impact environnemental de son aménagement *7pp, Présentation aux Journées de l'UR4. Modélisation et spatialisation des interactions Milieux & Sociétés, Orstom Orléans, Janv.98.*

[64] Cycle de conférences sur le thème "Structure géométrique et comportement hydrique des sols. Simulations exploratoires",1994,1995, *Journée de Pédologie, Orstom Bondy. 6 Septembre 1994, Journée du programme VERSE, UR24, Orstom Bondy, 16 Décembre 1994, CNRS Orléans, 16 Janvier 1995,Orstom Montpellier, 5 Avril 1995, INRA Avignon, 14 Avril 1995, INRA Rennes, 25 Avril 1995, Conférence invitée Cornell University, US, 24Mai 1995.*

[65] E. Perrier, C. Mullon, 1992. Simulation orientée-objet de structures de sol et de leur fonctionnement hydrique. *Séminaire "Approche orientée objet et modélisation orientée objet", Lab. Hydrologie, Orstom Montpellier, 12-13 Mai 1992.*

Supports de formations

[66] E.Perrier,1997-2002, supports de cours DEA Science du sol

[67] E.Perrier, D.Servat J-P.Treuil, J.Leonard, Ch.Cambier, Ch.Solignac, A.Drogoul. SMA et Simulation de dynamiques hydrologiques dans un environnement spatial hétérogène1999,2000,2001. *Document powerpoint, Formation Modélisation Multi-agents Cirad*

[68] E.Perrier, J.F.Delerue. 2000. Analyse d'images tridimensionnelles et simulation du comportement hydrodynamique des sols, *Document powerpoint, Journées recherche et Grandes Ecoles, ENGREF, 16 Mars 2000*

[69] E.Perrier,1999. Introduction aux fractales et exemples de modélisation en particulier en science du sol, *Document powerpoint, Journées MIA Cirad, 9 Sept.1999.*

[70] Ch.Mullon, J.P.Treuil, F.Bousquet, Ch.Le Page, E.Perrier, G.Pichon, St Pierre, Doyen, 1996,1997, Cours de l' Ecole d'été « Simulation des phénomènes complexes », *Orléans Juin 1997 et 1996, document 300 pp.Orstom*

[71] E. Perrier, 1992. Programmation d'interfaces et de graphisme sur stations de travail dans l'environnement Xwindows. *Deux supports de cours (progr. XWindows 40pp et progr. Xview 30pp.)*

Rapports

[72] Collectif Geodes, 2000. Projet d'Unité de recherches en Mathématiques et Informatique Appliquées à la modélisation des systèmes complexes naturels et sociaux : Géométrie des Espaces Organisés, Dynamiques environnementales et Simulations *Doc.interne IRD, 30pp.*

[73] E.Perrier, 1986. Modélisation et utilisation du filtrage numérique de Kalman pour l'obtention d'une mesure en temps réel du métabolisme de fond chez le rat. *Mémoire de DEA Université Paris 7, 50 pages.*

Vulgarisation

[74] E.Perrier, 1998. Interview sur la Simulation multi-agent, *Industries et techniques, no 797. Oct 98. pp.60-63.*

Diffusion logicielle

[75] E.Perrier, P.Garnier, Ch.Leclerc, 2002. ECOUL : an interactive computer tool to study hydraulic behavior of swelling and rigid soils, diffusion via un site Web:
http://www.bondy.ird.fr/~perrier/data/ecoul/logecoul.html

[76] J.F.Delerue, E.Perrier, 2002. DXSoil, a library for image analysis in soil science Librairie DXsoil, diffusion via un site Web :
http://www.bondy.ird.fr/~delerue/dxsoil/demo/index.html

[77] E.Perrier, 1994. Programme Simsol, génération de structures de sols fractales et simulation de leurs caractéristiques hydrodynamiques. Interface interactive et représentations graphiques intégrée. http://www.bondy.ird.fr/~perrier/data/micro.htm

[78] E.Perrier, 1992. SIM-SURF. Simulation numérique et graphique de l'infiltration et du ruissellement sur une surface de sol. Influence des états de surface et du relief. Méthodologie et exemples. *Document Orstom, 40 pp.*

[79] E.Perrier, G.Pichon, C. Mullon, 1990. TIPS, Traitement Informatisé des données de Pénétrométrie des Sols, in *Assessing the space and time variations of the surface features and the cultivation profile, de C.Valentin, IBSRAM Technical Notes no.5, Juin 1990.*

[80] E.Perrier, 1989. Logiciel ECOUL. Simulation numérique et graphique des écoulements dans la zone non saturée du sol. Principes, mode d'emploi, exemples de simulation. *Document Orstom, 50pp.*

[81] E.Perrier, J.Pennarun, 1988. GIL. Gestion informatisée des laboratoires d'analyses. 3 tomes. *Documentation interne Orstom, 200pp.*

DEUXIEME PARTIE : SYNTHESE DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Mon mémoire se structure, **section** (I), sous forme d'une liste, plutôt chronologique, apparemment disparate, de toute une série d'opérations que j'ai effectuées ou encadrées, principalement en modélisation hydropédologique. Il continue, **section (II),** sous forme d'une analyse plus synthétique et méthodologique de la démarche de modélisation informatique et mathématique sur laquelle mes recherches ont pris appui. Il se conclue, **section (III),** par une prospective sur mes recherches futures où je m'intéresse à la recherche de liens entre l'organisation géométrique de structures naturelles et les dynamiques de flux qui s'y produisent, toujours en focalisant sur des applications en hydropédologie.

La **section (I)** est la plus « consistante ». Les titres des opérations qui y sont décrites mettent en évidence l'accent mis sur la recherche en méthodes de modélisation et de simulation, quel que soit le domaine d'application. C'est ainsi que j'ai travaillé (voir ci-dessous), sur l'adaptation à diverses situations de modèles dynamiques à base d'équations aux dérivées partielles (I.2, I.3, I.7), sur le traitement numérique de données (signaux temporels en I.1, imagerie tridimensionnelle en I.5), sur la création de milieux virtuels pour schématiser des structures naturelles (I.4, I.9) et sur l'application dans ce contexte de la géométrie fractale (I.6), sur la conception de modèles distribués de processus dynamiques spatialisés (I.8, I.9), sur le couplage de modèles (I.7, I.8, I.10), etc.

I.1Modélisation et filtrage de données en physiologie

I.2 Simulation numérique en hydrodynamique des sols non saturés

I.3 Modélisation EDP des transferts hydriques en sol déformable

I.4 Structures de sols virtuelles et simulations hydrodynamiques exploratoires

I.5 Modélisation d'images tridimensionnelles de sols sous forme de réseaux de pores

I.6 Le modèle PSF : une formalisation mathématique de structures poreuses multi-échelles

I.7 Modélisation EDP du ruissellement et interaction avec de l'inflitration dans des macropores

I.8 Le projet RIVAGE : modélisation multi-agent de processus hydrologiques de surface

I.9 Simulation de la genèse d'une plaine alluviale : structure et hydrodynamique d'un aquifère

I.10 Simulation informatique multidisciplinaire de dynamiques spatialisées

Cependant une deuxième grille de lecture de mes travaux met en lumière **la recherche de modèles innovants sur le thème eau/sol** à plusieurs échelles (I.2, I.3, I.4, I.5, I.6, I.7, I.8, I.8) : modélisation des caractéristiques hydriques des sols en fonction de leur structure microscopique (I.4, I.5, I.6), modélisation de leur hydrodynamique à l'échelle continue d'un profil à saturation variable au sein d'une parcelle homogène (I.2, I.3), modélisation des écoulements de surface dans un environnement hétérogène (I.7, I.8), écoulements en milieu saturé dans les nappes en fonction des structures géologiques (I.9). C'est dans ce contexte que je me suis particulièrement investie en cherchant à contribuer au développement de connaissances, comme en témoignent la plupart de mes publications. C'est au sein des différentes sous-sections afférentes que l'on trouvera une analyse de l'état de l'art sur ces questions de recherches thématiques et son évolution au cours de dix dernières années. C'est dans les enchaînements entre ces diverses sous-sections que l'on verra comment l'appréhension de différents modèles existants pour décrire un même phénomène mais à différentes échelles contribue à un recul sur la notion même de modèle en tant qu'ensemble d'hypothèses et de formalismes simplificateurs.

En **section (II),** j'aborde une réflexion plus méthodologique sur la modélisation mathématique et informatique de milieux et dynamiques naturelles, lorsqu'il s'agit de

concevoir des modèles, de rechercher des méthodes pour les mettre en œuvre et de les situer par rapport à la réalité.

II.1 Création de modèles

II.2 Méthodes de recherche et recherches de méthodes

II.3 Modèles et mesures. Fiction et réalisme

Cette analyse s'appuie principalement sur ma propre expérience sur le thème eau-sol à différentes échelles, mais aussi sur tout un ensemble de travaux sur des thématiques plus éloignées dont j'ai pu suivre le déroulement avec intérêt. En effet le milieu multidisciplinaire dans lequel j'ai baigné pendant la majeure partie de ma carrière scientifique a fortement influencé ma recherche personnelle passée et oriente mes recherches futures.

En **section (III),** je décris l'orientation actuelle de ma recherche, dans le cadre général de la modélisation mathématique et informatique de systèmes complexes naturels et sociaux avec la direction d'une unité de recherches à l'IRD, mais aussi avec un projet personnel qui dépasse bien entendu tout cadre institutionnel.

III.1 Direction de l'unité de recherche GEODES

III.2 Projet personnel de recherches

Ce projet de recherche se situe dans la continuité de mes travaux antérieurs (relation entre un modèle multi-échelles de structures de sols à calibrer et à mettre en relation avec une meilleure compréhension des transferts hydriques en milieu hétérogène). Il se situe aussi dans une perspective transdisciplinaire de développement d'un modèle générique de percolation multi-échelles, support de la recherche de liens entre des types d'organisation géométrique et des types de dynamiques environnementales.

La première opération I.1 est atypique, puisqu'elle ne s'applique pas du tout en hydropédologie. On utilise un modèle de diffusion à base d'équations différentielles ordinaires dans des compartiments volumiques globaux, et il s'agit de mettre au point une méthode numérique d'inversion en temps réel pour estimer les paramètres physiologiques du modèle.

I.1 Modélisation et filtrage de données en physiologie [8]

Les travaux de recherche que j'ai effectués durant et après mon stage de DEA au Laboratoire CNRS de Neurobiologie des Régulations du Collège de France constituent mon premier contact avec la modélisation [73][9]. Il s'agissait d'utiliser un dispositif de mesures expérimentales sur une cage contenant un rat pour estimer en temps réel (au fur et à mesure de l'acquisition automatique des données) les variations du métabolisme dit "de fond" de l'animal [Even, 1984]. Mon travail consistait à utiliser le filtrage numérique de Kalman [Kalman, 1960] pour extraire de divers signaux (activité motrice, prise alimentaire, composition de l'air en entrée et sortie de cage) des informations indirectes sur le métabolisme et l'activité pré et post prandiale. Le filtrage se base sur un modèle qui représente le système de mesure expérimental, modèle qui, dans notre cas, établissait des relations entre les mesures effectuées avec plus ou moins d'incertitude en sortie de cage après diffusion et la valeur des variables que nous cherchions à estimer au niveau du rat lui-même. La difficulté venait de la non-linéarité de ces relations imposant d'utiliser une extension du filtrage de Kalman. Les résultats ont donné lieu à la publication d'un article [19] sur les techniques mises en œuvre et l'estimation du métabolisme de fond par cette méthode a servi ultérieurement à tester différentes hypothèses ayant cours en biologie sur les relations entre métabolisme et prise de nourriture.

Je retiendrai de ce travail, a priori seulement numérique, deux sujets de réflexion bien connus, en guise d'introduction à ce mémoire :

- Entre la définition théorique d'une variable donnée et sa valeur, il y a souvent plus qu'un dispositif et des incertitudes de mesure directe, mais une estimation indirecte liée à un modèle. L'incertitude due aux calculs numériques du filtrage était évaluée par des méthodes statistiques (matrice de variance-covariance des erreurs d'estimation) mais comment évaluer l'impact du modèle lui-même ?

Pour pallier l'impossibilité de dominer toutes les étapes d'un processus de recherche, on assiste généralement à un partage des compétences entre les numériciens et les thématiciens, mais jusqu'où peut-on se contenter d'une étroite collaboration ?

---

[8] Opération ponctuelle DEA et post DEA (1986-1987)

[9] Les références par numéro se rapportent à des documents décrits dans ma liste de publications, à consulter à la fin de la première partie de ce mémoire. Les autres références bibliographiques sont données sous la forme [auteur, année] et se rapportent à la liste donnée section V.

Dans la deuxième opération I.2, il s'agit de mettre en œuvre une résolution numérique du modèle de Darcy-Richards, qui représente les processus d'écoulements d'eau dans le sol par une EDP (équation aux dérivées partielles). Ma recherche s'est située au niveau de l'interface utilisateur/modèle. Je donne malgré tout une description succincte des principes de modélisation utilisés parce qu'ils situent le contexte de la plupart des opérations suivantes.

I.2 Simulation numérique en hydrodynamique des sols non saturés[10]

En tant qu'ingénieur Orstom, j'ai développé un code numérique de simulation des écoulements d'eau dans un profil vertical de sol, basé sur une résolution classique de l'équation de Richards [Richards, 1931] décrivant les écoulements d'un fluide dans un milieu poreux « non saturé », en l'occurrence un sol rempli d'eau et d'air en quantités variables. Il s'agissait de mettre en œuvre une méthode de résolution d'une équation aux dérivées partielles non-linéaire en se ramenant, après une discrétisation spatio-temporelle respectant au mieux les bilans de masse (équation de continuité) à une résolution d'un système d'équations linéaires calculable. Les méthodes que j'ai employées [Touma, 1987] n'ont rien d'original au niveau du principe de modélisation, très ancien, et les problèmes rencontrés sont essentiellement d'ordre numérique [Haverkamp et al., 1977]. L'objectif était de fournir un code « prêt à l'emploi » pour des chercheurs en agronomie ou en science du sol non spécialistes d'une modélisation physicienne des écoulements d'eau. Des outils du même type sont maintenant développés, maintenus et vendus par des équipes de chercheurs américains [Simunek *et al.*, 1999].

L'aspect recherche, méthodologique, consistait à innover dans le domaine des applications informatiques, puisque les outils de développement d'applications en multifénêtrage graphique et interactives n'en étaient qu'au stade exploratoire [71], notamment dans les instituts de recherche autre qu'informatique. J'utilisais la notion d'interface utilisateur et surtout j'explorais l'usage de la visualisation des résultats d'un modèle au fur et à mesure des calculs numériques en tant que contrôle du fonctionnement du modèle lui-même (voir Figure 1). L'utilisation du logiciel, disponible pendant longtemps seulement sur stations de travail Sun [80], porté ensuite dans l'environnement PC-Windows [35] est resté limité, essentiellement pour des raisons de maintenance informatique. Sa diffusion actuelle sur un site Web [75] a été encouragée à la fois pour le pouvoir didactique d'un tel logiciel, toujours d'actualité, et parce qu'il a intégré une extension pour les écoulements dans les sols déformables (voir opération I.3 suivante), qui reste apparemment unique et recherchée (Van Genuchten, communication personnelle).

Bien qu'ayant seulement utilisé le modèle d'écoulement en tant que modèle « préétabli », je vais en donner ici quelques éléments auxquels je me référerai par la suite. En effet c'est la référence en matière de modélisation déterministe et physicienne pour toute la communauté de chercheurs en hydrologie et en hydrophysique du sol, et que c'est la référence pour la plupart de mes travaux de recherche. Je qualifie ce modèle d'écoulement de modèle Darcéen, dans la mesure où l'équation de Richards généralise l'approche utilisée au départ pour les écoulements en milieu saturé, basée sur la loi de Darcy. La loi de Darcy (1856, cf. de Marsily, 1981) peut être vue de façon empirique, ou comme une intégration sur un milieu poreux des équations de Navier-Stokes régissant la mécanique des fluides [Withaker, 1986]. Elle établit une relation de

[10] En arrière plan durant toute ma carrière Orstom-IRD (1987-2002)

proportionnalité entre un flux moyen de fluide traversant un échantillon, saturé par ce fluide, et le gradient de pression imposé aux bornes, tant que l'écoulement reste non-turbulent.

$$q = K\Delta P \qquad (1)$$

Le coefficient de proportionnalité K dépend du fluide (c'est la conductivité hydraulique pour un milieu rempli d'eau) et surtout du milieu poreux et de sa perméabilité intrinsèque. On calcule généralement cette perméabilité au moyen de ce que je considère comme une méthode inverse de premier degré, c'est-à-dire en supposant la loi valide et en faisant des mesures de flux sous condition de pression contrôlées sur un échantillon. La loi de Darcy est ensuite étendue aux milieux hétérogènes que l'on peut souvent caractériser par une perméabilité moyenne « équivalente » [Indelman, 2002] résultant de la mise en réseau d'un ensemble de blocs de perméabilité variable (variabilité spatiale que l'on cherche généralement à appréhender avec des méthodes géostatistiques). Il en résulte que la perméabilité dépend de l'échelle d'étude et n'est vraiment caractéristique d'un milieu donné que lorsqu'il existe une échelle à laquelle on peut considérer ce milieu comme un espace continu et homogène, et qu'il est possible d'en extraire un échantillon représentatif mesurable (volume élémentaire représentatif). A l'échelle du logiciel Ecoul qui ne traite que le cas d'écoulements mono-dimensionnels verticaux dans un profil de sol, l'hétérogénéité peut provenir de la superposition verticale de couches de sol dont la conductivité hydraulique diffère, et on utilise alors des moyennes aux nœuds frontières (par défaut, une moyenne géométrique). On utilise en fait des conductivités différentes à chaque nœud de la discrétisation spatio-temporelle, parce que la loi de Darcy a été généralisée au cas non saturé, et que la conductivité hydraulique K y dépend alors de la teneur en eau θ, et qu'elle est donc éminemment variable dans l'espace et dans le temps. Cette variabilité de la teneur en eau induit aussi des gradients de pression capillaire $h(\theta)$ locaux, et l'écoulement est alors décrit par une équation hautement non-linéaire, celle de (Darcy-)Richards.

$$q = K(\theta)[\Delta P + \Delta(h(\theta))] \qquad (2)$$

C'est ainsi qu'à partir d'une simple loi de proportionnalité dans un milieu considéré comme homogène à une certaine échelle, l'hétérogénéité sous toutes ses formes (composition du milieu, teneur en eau, etc.) conduit donc à des modèles de plus en plus complexifiés pour continuer à être applicables de façon globale sur l'objet d'étude. Les données d'entrée du modèle sont elles-aussi moins simples. Dans le cas d'école du logiciel Ecoul (restreint aux écoulements monodimensionnels), il faut en particulier connaître les deux courbes $K(\theta)$ et $h(\theta)$ considérées comme des caractéristiques fondamentales du sol dans le domaine de l'hydrodynamique des milieux non saturés.

Je ne ferai que citer ici l'existence de nombreuses études pour les écoulements bi- et tri-dimensionnels, en saturé comme en non saturé, en milieu homogène et hétérogène, et sous l'effet de gradients de pression de toute nature. L'approche darcéenne est donc très utilisée et sa « validité » tout autant discutée, notamment en présence d'hétérogénéités aléatoires ou structurées (plus de 100 références en 2002 dans la base CNRS-Inist). Elle est aussi mise en cause dans les milieux déformables où les volumes représentatifs varient de volume... avec par exemple la teneur en fluide.

La troisième opération I.3 se situe dans le cadre du test de la validité de l'approche Darcy-Richards dans le cas de sols gonflants à travers la recherche d'une extension du modèle de référence. S'y rajoute l'adaptation d'une méthode inverse pour déterminer les caractéristiques hydriques permettant de calibrer le modèle.

I.3 Modélisation EDP des transferts hydriques en sol déformable [11]

La majorité des sols présentent la particularité d'être soumis à des phénomènes de déformation sous contrainte hydrique, dus à la présence d'argiles (phénomènes de gonflement-retrait). Les chercheurs en science du sol (laboratoires INRA Orléans et Versailles, CSIRO australien, etc.) entre autres ceux du laboratoire d'hydrophysique qui fut créé à l'Orstom en 1987, étaient particulièrement sensibilisés à ce fonctionnement spécifique du milieu poreux sol. Des instruments originaux de mesure de variation de volume d'échantillons avaient été mis au point, et leur perfectionnement s'est poursuivi [Braudeau et al. 1999]. Il s'agissait donc de concevoir des modèles capables de tenir compte des déformations de structure. Certains chercheurs [Braudeau, 1988] étaient persuadés que la compréhension des phénomènes de déformation des sols permettrait d'accéder à des descripteurs fondamentaux de leur structure intime conditionnant tout leur fonctionnement dynamique, d'autres pensaient seulement que la loi de Darcy sortait de son domaine de validité.

J'ai travaillé avec une étudiante en thèse, P.Garnier, pour mettre au point des extensions du modèle Darcy-Richards en utilisant une approche Lagrangienne dans un repère lié au sol en déplacement [15][13]. Les données d'entrée du modèle incluent alors une troisième courbe pour la caractérisation hydrodynamique du sol, à savoir la courbe $V(\theta)$ volume / teneur en eau.

Ces travaux ont permis de conclure que l'équation de Darcy-Richards peut se généraliser au cas des sols déformables, au moins dans les conditions expérimentales testées sur petits échantillons de laboratoire soumis à évaporation, à condition de prendre les précautions nécessaires sur la nature des variables à mesurer (la teneur en eau par exemple n'est plus volumique mais massique).

Nous avons alors introduit ces algorithmes originaux dans le logiciel Ecoul précédemment développé pour les sols rigides (voir Figure 1) et publié récemment [5] après avoir constaté que le sujet du type de modélisation pour les transferts en sol déformable reste toujours d'actualité [Saiyouri et al., 2000].

---

[11] Autour de la thèse de Patricia Garnier (1992-1996)

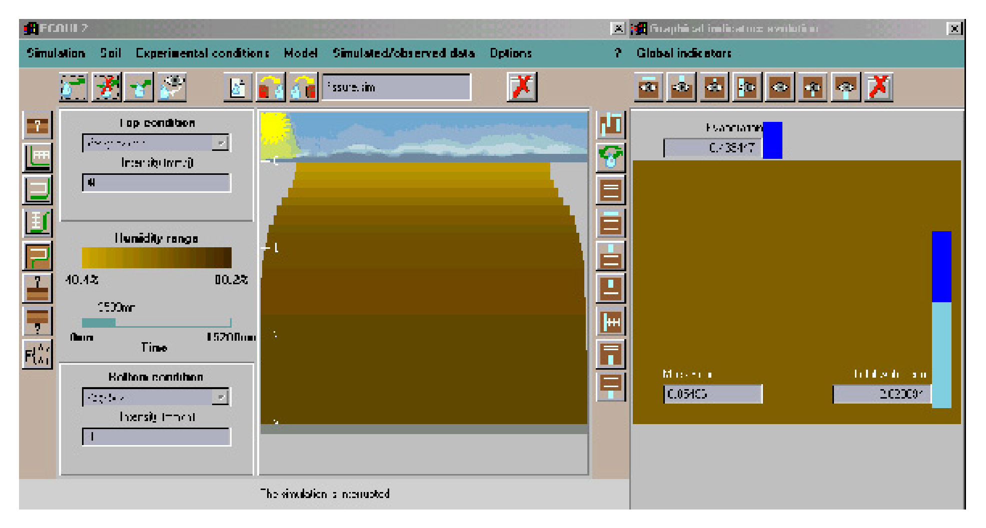


Fig.1 Copie d'écran logiciel Ecoul
(simulation d'une évaporation sur un échantillon de sol déformable initialement saturé en eau)

Notons que j'ai aussi travaillé sur la méthode inverse développée en utilisant la méthode d'optimisation géométrique du simplexe par Garnier (1996) dans le cas des sols déformables afin de la généraliser dans le cadre du logiciel [35] [5]. On trouvera dans [Garnier et al., 1997] de nombreuses références sur l'utilisation de méthodes inverses pour la caractérisation hydrodynamique et ce champ de recherche est toujours actif [e.g. Bruckler et al., 2002]. En effet, il n'est pas si facile que cela de mesurer « directement » les paramètres des courbes $h(\theta), K(\theta)$ (voire $V(\theta)$), à savoir les données d'entrée du modèle d'écoulement. Bien que considérées comme des caractéristiques intrinsèques du milieu eau-sol, on les estime souvent, et c'est particulièrement vrai en ce qui concerne la conductivité hydraulique, à partir d'un modèle d'écoulement de type Darcy-Richards plus ou moins simplifié. En utilisant explicitement une méthode inverse, on effectue délibérément un calage des paramètres du modèle, qui s'avère satisfaisant si le fonctionnement du milieu réel est relativement bien expliqué par le modèle, et qui s'avère utile s'il permet de faire fonctionner ultérieurement le modèle en terme de prévision.

La quatrième opération ouvre un véritable travail de recherche en physique des sols sur la modélisation de la structure microscopique des sols rigides ou déformables afin de mieux comprendre leur fonctionnement hydrodynamique. Les caractéristiques hydriques précédemment utilisées à l'échelle continue et intégratrice du modèle de Darcy-Richards sont ici calculées en adaptant un modèle de réseaux de pores lui-même issu d'une intégration simplifiée des équations de Navier-Stokes. Il s'agit d'une recherche exploratoire qui a été conduite en construisant des structures artificielles sur ordinateur, notamment des structures fractales, et en concevant un simulateur support du raisonnement scientifique.

I.4 Structures de sols virtuelles et simulations hydrodynamiques exploratoires. [12]

La nature de la relation entre l'organisation structurale des sols et leur fonctionnement hydrodynamique était et reste l'objet d'une question ouverte et de nombreuses recherches. Le sol constitue un milieu extrêmement complexe, même en le considérant comme un simple matériau poreux inerte. La recherche sur le fonctionnement hydrodynamique des milieux poreux dépasse largement le cadre de la science du sol. Même dans les milieux poreux les plus simples, il est difficile d'établir des relations exactes entre l'organisation géométrique de l'assemblage des vides et les solides et sa perméabilité relativement à un fluide donné, bien que ces relations existent puisqu'elles résultent potentiellement de la difficile intégration des équations de Navier-Stokes régissant la mécanique des fluides, en tenant compte des limites de l'espace poral. Dans le sol, on rajoute l'existence d'une multiplicité d'échelle qui part de la taille des interstices entre grains de sable, de celle des pores d'origine biologique ou des fissures de gonflement-retrait et qui pourrait aller jusqu'aux plus petites tailles des espacements variables entre des feuillets d'argile. On rajoute aussi une déformabilité bien plus importante que pour la plupart des poreux, sous l'effet des phénomènes de gonflement-retrait de l'argile se répercutant à toutes les échelles de la structure.

L'idée initiale de la modélisation consistait à construire des structures de sols sur ordinateur afin de tester des hypothèses de fonctionnement, essentiellement sur le comportement hydrodynamique en fonction des déformations de structure. Mais un problème de fond apparut immédiatement : comment représenter une structure de sol, autrement que par différents types d'empilement de grains, comme pour certains types d'expériences numériques physiciennes qui traitent de milieux poreux idéaux, ou par des réseaux de pores, eux aussi utilisés par les physiciens dans un cadre théorique, mais peu aptes à modéliser des déformations de la phase « solide », puisqu'elle n'y est pas explicitement prise en compte ? Après de premières tentatives sur des empilements aléatoires d'agrégats déformables, j'ai très vite décidé de commencer à travailler à partir de modèles fractals, en m'inspirant des travaux de Rieu&Sposito (1991) qui avaient conçu un modèle théorique de sols comme un ensemble d'agrégats emboîtés permettant de rendre compte de la large gamme d'échelles de tailles de pores présents dans un échantillon de sol.

J'ai alors programmé tout un ensemble d'algorithmes visant à construire explicitement des structures de sols virtuelles comme un ensemble d'entités informatiques, des vides et des solides sur plusieurs niveaux d'organisations. J'ai notamment développé des tesselations de Voronoï récursives et mis en œuvre des principes et des techniques – alors récentes- de programmation objet [Ducourneau et al.,1998] [65] pour représenter un ensemble de pores, de

---

[12] Ma thèse (1991-1994)

solides et d'agrégats de solides ainsi que leurs relations de voisinage et de hiérarchie sur plusieurs niveaux successifs de fragmentation.

En ce qui concerne la modélisation du fonctionnement hydrodynamique, j'ai très classiquement cherché à estimer les courbes caractéristiques du fonctionnement hydrique d'un sol non saturé, entrées nécessaires du modèle de Darcy-Richards utilisé à l'échelle du continu, en fonction des caractéristiques structurales. En me basant sur la Loi de Laplace reliant pression capillaire et taille des pores remplis d'eau, j'ai retrouvé l'expression analytique modélisant la relation entre la dimension fractale de la structure et la courbe de rétention d'eau, telle que prévue par le modèle théorique et testée sur des données expérimentales [Rieu et Sposito, 1991] ; et j'ai montré qu'elle se généralisait à des structures irrégulières (fractales statistiques). Pour ce qui est de la courbe de conductivité hydraulique à une teneur en eau, j'ai dû à nouveau développer des algorithmes permettant d'extraire des structures simulées un réseau de pores sur lequel, en empruntant aux méthodes physiciennes, couramment utilisée pour les réseaux de fractures [Cacas et al.1990] mais aussi en milieu non saturé [Blunt et al., 1992], je pouvais calculer une conductivité équivalente. La méthode employée se base sur une utilisation des formules intégrales des équations de Navier-Stokes dans des conduits de forme simple, une analogie électrique et enfin une résolution de système linéaire. Parce qu'elle permet de tenir compte des chemins conducteurs d'eau sur un réseau, elle met en évidence de façon didactique l'importance de la connectivité du réseau de pores pour les phénomènes d'hystérésis affectant principalement la courbe de rétention, et surtout pour la prévision des valeurs numériques de la conductivité hydraulique

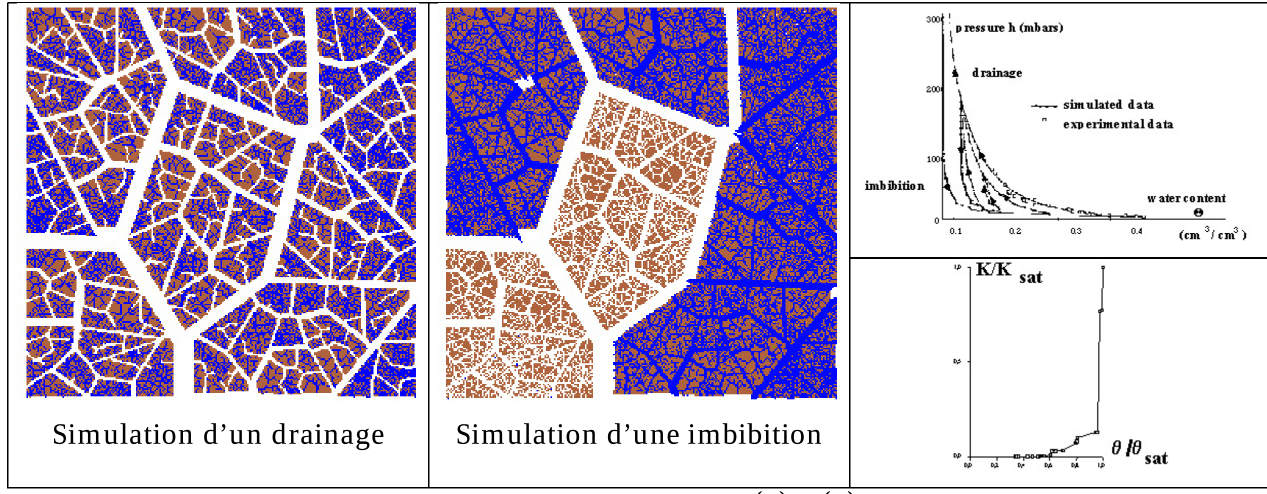


Figure 2 : Simulation des deux courbes caractéristiques $h(\theta), K(\theta)$ du fonctionnement hydrique d'un sol rigide non saturé sur une structure virtuelle fractale[13]

Mais il est très difficile de formaliser et à plus forte raison de quantifier la connectivité d'un sol réel, et je pouvais tout au plus inventer des structures virtuelles (avec de plus une abstraction conceptuelle pour passer du 2D au 3D), construites de telle façon que l'on puisse par simulation retrouver une courbe de rétention expérimentale et la forme d'une courbe de conductivité hydraulique. Autrement dit, alors que je cherchais à prévoir des caractéristiques hydriques à partir de caractéristiques structurales, j'arrivais au résultat inverse.

[13] Différentes hypothèses concernant l'accessibilité de tel ou tel pore sur le réseau notamment suivant les conditions d'imbibition (entrée d'un fluide mouillant, ex l'eau chassant l'air) ou de drainage (entrée d'un fluide non mouillant, ex l'air chassant l'eau) peuvent être testées

De la même façon, en ce qui concerne la déformation du sol sous contrainte hydrique, alors que je voulais comprendre les phénomènes de déformation observés sur des échantillons au laboratoire à partir d'hypothèses sur la nature des déformations locales, j'ai pu développer des méthodes de gestion et de visualisation des déformations de l'assemblage microscopique en respectant une courbe mesurée volume / teneur en eau donnée à l'échelle globale d'un échantillon, mais je n'ai pu discriminer un scénario d'un autre en ce qui concerne les différentes hypothèses possibles sur les réarrangements internes de la structure.

Ces travaux qui, décrits de cette façon, pourraient presque apparaître comme s'étant soldés par un échec, ont eu un grand retentissement dans la communauté des chercheurs en science du sol, en France et à l'étranger. En effet c'était la première fois que l'on cherchait à quantifier et à représenter des structures de sol en associant un point de vue très naturaliste et visuel sur l'organisation des sols, notamment en ce qui concerne leur déformation, et un point de vue très physicien de la modélisation des caractéristiques hydriques à une échelle « macroscopique » à partir d'une intégration numérique de lois élémentaires agissant à une échelle « microscopique ». Depuis de nombreux travaux à l'échelle des réseaux de pores ont été introduits en science du sol (voir par exemple plusieurs communications au colloque sur les milieux non-saturés organisé en 1997 à Riverside [36] ou [Vogel et Roth, 2001]), mais la déformabilité est toujours négligée. Dans le même ordre d'idée des modèles théoriques sont toujours utilisés pour les réseaux de fractures [Dreuzy et al., 2001] et les paramètres principaux restent la connectivité et la distribution de taille des ouvertures, les contraintes géométriques relevant de l'organisation phase solide duale n'est jamais prise en compte.

Le résultat de mes recherches consistait essentiellement à mettre en évidence l'effet déterminant de la structure et de la connectivé des sols sur le fonctionnement hydraulique, et confirmait la nécessité de continuer par défaut la recherche de relations statistiques dites de pédotransfert en attendant de trouver de nouveaux moyens de quantification de la structure des sols susceptibles de calibrer des modèles déterministes tels que celui que je cherchais à développer.

Par ailleurs, mes travaux alimentaient une controverse entre théoriciens sur l'expression de la courbe de rétention d'eau (relation pression / teneur en eau) dans une structure fractale. J'avais montré que l'expression analytique de la courbe de rétention d'eau dans un milieu poreux fractal telle que prévue par Rieu&Sposito [1991] était valide au sens où elle s'ajustait bien sur les données simulées et permettait de retrouver la valeur de dimension fractale choisie par construction de structure, alors que j'invalidais une autre expression analytique établie elle aussi pour un milieu fractal parce que ces deux même tests s'avéraient négatifs. Cependant, cette deuxième expression était soutenue dans plusieurs articles de chercheurs de sciences du sol [Tyler&Wheatcraft, 1990], d'autant plus qu'elle correspondait à l'expression empirique de Brooks&Corey [1964] établie depuis longtemps comme la plus adaptée pour modéliser de nombreux sols, et qu'elle correspondait aussi aux théories fractales de de Gennes [1985]. Le fait est que le seul modèle géométrique (au sens d'un assemblage cohérent de vides et de solides) existant était celui que j'avais cherché à construire, et qu'il n'en existait pas permettant de justifier la deuxième version. J'avais alors, inventé, à la fin de ma thèse, un nouveau modèle de structure, que j'ai repris plus tard (voir le modèle « PSF » section I.6) et dont j'ai compris alors qu'il avérait unifier les deux versions contradictoires en les généralisant sous une forme plus simple.

La diffusion de la thèse que j'ai soutenue sur ce sujet (premier tirage, 1994, édition Etudes&Thèses 1995) m'a valu une reconnaissance de nature internationale dans le milieu concerné par mon sujet, dès la parution des premières communications [39] [38] [57] [56] [55] [54] puis des premiers articles sur la méthode [18] [17] et enfin de ceux qui ont alimenté par la suite le débat théorique sur les sols fractals [16] [14].

L'effet prépondérant de la connectivité du réseau poral sur tout processus de flux dans un milieu poreux est reconnu, mais reste difficile à mesurer et à quantifier, surtout à partir d'images classiques de sections planes. De nombreuses équipes de recherche acquièrent désormais des images tridimensionnelles par tomographie et la recherche d'algorithmes informatiques vise à fournir des outils de traitement et d'analyse automatisée de la structure poreuse identifiée dans une image. Dans les travaux qui suivent, nous cherchons aussi à simuler l'invasion d'un fluide dans cette structure, à l'échelle des pores, afin de tester l'approche de simulation du fonctionnement hydrique à ce degré de simplification. Cela conduit à modéliser la notion de pore sous une forme algorithmique et la notion de structure sous forme d'un réseau de pores interconnectés.

I.5 Modélisation d'images tridimensionnelles de sols sous forme de réseaux de pores[14]

Beaucoup de techniques de mesure ont été développées ces dernières années pour produire des données tridimensionnelles : coupes sériées, tomographie à rayon X ou résonance magnétique nucléaire permettent d'accéder à des images tridimensionnelles d'échantillons de sol à partir desquelles on peut visualiser la structure interne d'un milieu poreux. Après avoir conduit un travail d'exploration sur structures virtuelles, j'ai décidé de lancer un projet de recherches pour extraire de telles images des données concernant les réseaux de pores réels. Ce projet intitulé « Analyse d'image et structure des sols » fut soutenu par le LIAMA (Laboratoire franco-chinois de Pékin en informatique, automatique et mathématiques), où travaillent des spécialistes d'analyse d'images associés avec l'INRIA, et fut monté en collaboration avec des équipes de sciences du sol de l'INRA Rennes, de l'ENS Paris et de l'Académie des sciences de Nankin. Le travail a été réalisé majoritairement par un étudiant en thèse informatique français, Jean François Delerue, qui a fait un long séjour au LIAMA, et y a encadré un étudiant en master. J'ai assuré la direction scientifique de ce projet et notamment de la thèse.

Il s'agissait donc de concevoir des algorithmes d'imagerie tridimensionnelle susceptibles d'apporter des quantifications nouvelles sur la structure des sols. Certains travaux, en science du sol ou en géologie, démarraient [e.g. Cousin et al., 1996] pour calculer des spectres de porosité sur de telles images, ou pour tenter d'établir des indices de connectivité, en utilisant des méthodes de morphologie mathématique ; d'autres, plus physiciens, pour mettre en place des simulations de circulation de fluide sur l'image brute en utilisant des méthodes numériques diverses basées généralement sur des approximations calculables des équations de Navier Stokes en saturé [communications orales, publications en 2D seulement]. Quant à nous, nous cherchions à extraire des réseaux de pores de ces images, avec pour objectif de pouvoir à la fois obtenir des informations sur la forme et le type de connectivité de ces réseaux, et tester des simulations hydrodynamiques simplifiées à l'échelle des pores.

[14] Autour de la thèse de J-F.Delerue (1997-2001) et post-doc (2001-2002)

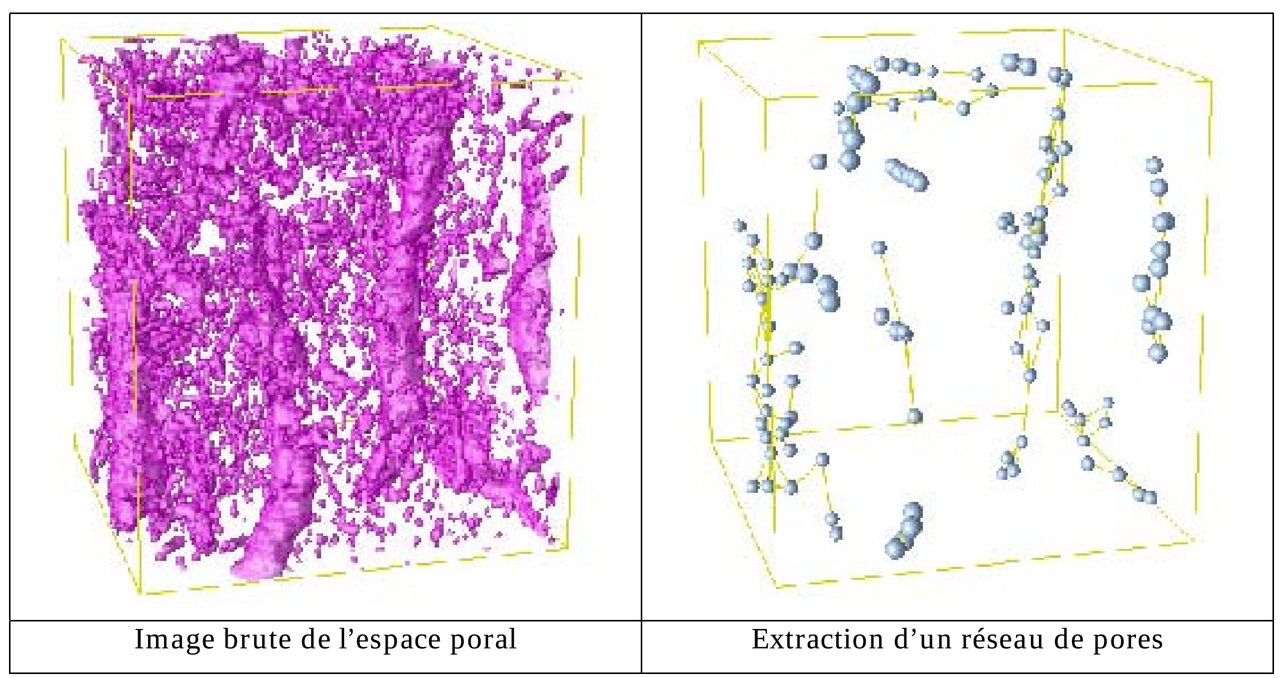


Figure 3. Analyse d’images tridimensionnelles

De nombreux algorithmes originaux ont été développés à cette occasion. Les méthodes d’extraction de squelette tridimensionnel en étaient à leur début et une méthode opérationnelle a donc été développée dans le cadre spécifique du projet ; il fallait surtout définir la notion d’objet pore dans une image tridimensionnelle, à partir de la vision intuitive que l’on peut en avoir, et en fonction d’une notion de taille et de forme de ces pores, susceptible de supporter un modèle de fonctionnement hydrodynamique local basé sur des lois physiques simplifiées. Cette définition a été donnée sous forme algorithmique et a permis de partitionner les images en un ensemble de pores résultant d’une série d’algorithmes compliqués mais rapides, et tout à fait satisfaisants au sens où le résultat correspond à l’analyse visuelle qu’en font les observateurs du domaine [11]. Il s’agissait ensuite de calculer les interconnections sous forme d’extraction automatisée d’un graphe de voisinage, puis de développer des méthodes de simulation d’invasion de fluide et de conductivité sur le réseau de pores obtenu, similaires à celles qui avaient été utilisées sur les modèles théoriques. Là aussi, plusieurs hypothèses simplificatrices ont été faites, notamment sur les conductances locales aux nœuds d’un réseau placés au centre de chaque objet pore, très voisines de ce qui a cours pour les réseaux de fissures [Cacas et al.1990].

Les résultats, en terme de simulation de courbes de rétention d’eau ou de courbes de conductivité hydraulique sur un échantillon de sol sont prometteuses [32], mais le problème majeur reste la résolution des images disponibles qui ne permet pour l’instant d’accéder qu’aux pores les plus larges et donc qu’aux caractéristiques hydriques au voisinage de la saturation. Dans d’autres matériaux poreux plus « grossiers » les calculs de perméabilité obtenus grâce à la méthode développée semblent particulièrement proches des valeurs expérimentales [Delerue et al., 2002] et confirment les potentialités de la méthode employée, et ce malgré toute la succession d’hypothèses simplificatrices effectuées.

Ce travail fournit donc une bibliothèque de procédures d’analyse d’images, une série d’algorithmes compliqués du point de vue de la programmation, mais automatisés et applicables de façon identique sur n’importe quel type de géométrie de milieu poreux, et qui s’intègre dans la panoplie des outils de traitement d’images tomographiques dont la communauté des chercheurs milieux poreux cherche à munir (Ex numéro spécial sur la

tomographie du Journal de la Geology Society of London, à paraître 2003). Le principal résultat est un réseau de pores simple sur lequel on peut conduire des simulations à l'échelle de l'échantillon mesuré.

La bibliothèque de procédures est déjà utilisée par plusieurs équipes de recherche en science du sol ou des poreux (INRA Rennes, KU Leuven) [3], elle vient d'être mise à la disposition de tous via une publication [6] donnant accès à un site Web. Elle fournit déjà comme sous-produit des distributions de tailles de pores ou de solides qui sont des données de base pour la quantification des structures en science du sol. Utilisée systématiquement - sachant que les acquisitions d'images tridimensionnelles sont en plein essor dans de nombreux laboratoires -, ceci devrait à terme permettre d'accéder à des mesures de connectivité, et permettre l'élaboration de typologies et d'indicateurs fondamentaux pour la prévision du fonctionnement dynamique d'un milieu poreux homogène en fonction de sa structure.

Dans plusieurs autres équipes, on continue de tester des algorithmes de simulation directe sur l'image tridimensionnelle à l'échelle de Navier-Stokes mais en milieu saturé seulement [Santos et al., 2002]. Mais dans un milieu aussi hétérogène que le sol, et qui plus est généralement non saturé, il faudrait être en mesure de traiter toute une série d'échantillons et ce à différentes échelles et à différentes teneurs en eau. Certains auteurs appréhendent la variabilité spatiale en poursuivant des recherches de reconstruction de réseaux de pores modèles dont seules les propriétés statistiques seraient identiques à celles des images issues d'un échantillonnage spatial des sols [Vogel et Roth, 2001, Sok et al.]. Mais cela n'est appliqué qu'à un ou deux niveaux de résolution donnés, et le besoin de modèles capables d'extrapoler au delà d'une échelle d'observation donnée reste toujours d'actualité.

Un problème majeur pour la mesure comme pour la modélisation de structures de sol réside dans la multiplicité des échelles. C'est pourquoi beaucoup de chercheurs se sont penchés sur l'utilisation de modèles fractals. Eclairée par mes travaux de simulations exploratoires, j'ai progressé sur une approche purement théorique et mathématique de la modélisation multi-échelles des structures de sol, qui permet d'une part d'unifier les approches fractales précédentes en les généralisant sous forme d'un modèle géométrique très simple, d'autre part de faire quelques pas supplémentaires sur la recherche raisonnée de liens déterministes entre caractéristiques structurales et caractéristiques de fonctionnement hydriques.

I.6 Le modèle PSF : une formalisation mathématique de structures poreuses multi-échelles [15]

A la suite de ma thèse, j'avais soulevé un débat animé concernant la modélisation fractale des sols. En effet il existait et existe encore toute une littérature internationale sur le sujet (6100 articles sur la période1990-92 couverte par la base CNRS-inist en réponse aux mots-clefs « fractal and (soil or porous) »). Cela se justifie par le besoin criant de quantifications de structure, de « nombres » servant à établir des typologies et des indicateurs d'évolution de structures, voire à établir des liens avec les caractéristiques de fonctionnement. Malheureusement les notions de dimension fractale, de distributions et de géométries fractales [Mandelbrot, 1983] sont utilisées très différemment d'une équipe à une autre, d'une discipline à une autre : certains parlent de distribution fractale de taille de pores, d'autres de distribution fractale de taille des particules solides, ou des agrégats de particules, d'autres de la fractalité des aspérités présentes sur la surface rugueuse de séparation entre les vides et les solides, d'autres encore des mesures porosité ou de densité variant avec la taille de l'échantillon ou l'échelle de résolution ; j'ai découvert que les modèles schématiques employés en science du sol [Tyler et Wheatcraft, 1990] et en géologie [Katz et Thompson, 1985] sont carrément inversés, la même image d'un modèle fractal lacunaire telle un tapis de Serpinski représentant pour les uns l'espace poral, et pour les autres son dual, l'espace des solides. De façon générale, les nombreux articles publiés sur le sujet [e.g. Crawford et al.,1993 ; Perfect et al.,1996, Baveye et al., 1998 ; Bartoli et al., 1999 ; Pachepsky et al., 2000] établissent ou utilisent des formules mathématiques à la fois similaires et souvent contradictoires, parfois chez les mêmes auteurs [Tyler et Wheatcraft, 1990, 1992], dans des contextes d'application qui apparaissent parfois tout à fait différents malgré l'étiquette « fractale » commune.

En collaboration avec Nigel Bird, mathématicien dans un laboratoire de science du sol anglais (Silsoe Research Institute, UK) et Michel Rieu (IRD), nous avons repris les idées apportées à la fin de ma thèse pour formaliser un modèle de structure particulièrement simple, en s'inspirant aussi des travaux publiés par le Russe Neimark [1989] dans un contexte de percolation multi-échelles purement théorique et étranger à la science du sol.

En quelques mots, il s'agit de concevoir une structure poreuse quelconque comme un ensemble de solides « noirs », de vides « blancs », et de parties « grises » qui révèlent ensuite des sous parties noires, blanches, et grises (jaunes sur la figure 4), et ainsi de suite avec une série d'itérations successives. Nous avons défini formellement ce modèle que nous avons nommé le PSF (Pore Solid Fractal), il est « fractal » lorsque les paramètres sont identiques à chaque itération, et seulement multi-échelle s'il s'agit de modéliser un milieu poreux quelconque.

---

[15] Mes travaux en 1998-2002

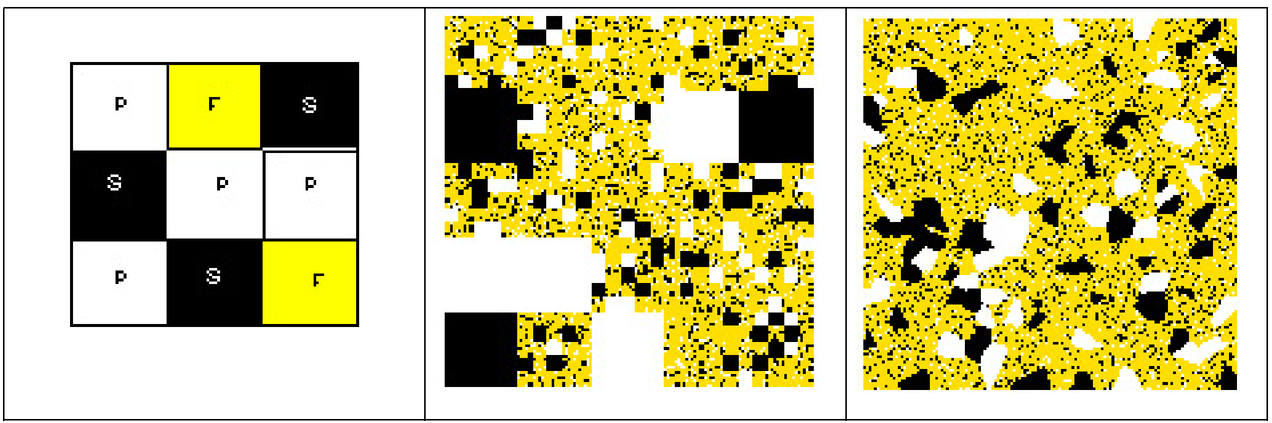


Figure 4 : Le modèle PSF (a) partition d'un espace en P pores, S solides et F parties se redivisant
(b) 3 itérations avec répartition aléatoire sur une grille régulière
(c) idem avec une tesselation irrégulière

De façon formelle, on considère donc une région représentative *R* de taille linéaire *L*, (par exemple un cube de volume L^3 dans un espace euclidien de dimension 3), que l'on divise en 3 sous-ensembles *P*, *S* et *F* (Fig. 4.a). Les ensembles *P* et *S* représentent respectivement les phases vide (des pores) et solide, qui sont considérées comme bien identifiées à un niveau de résolution donnée (par exemple les parties totalement blanches ou totalement noires dans une image de milieu poreux avant binarisation), et l'ensemble *F* représente la partie complémentaire (grise et mal-définie) pour laquelle il faut augmenter le niveau de résolution pour identifier à nouveau d'autres composants de *P* et *S* de taille plus petite. A chaque niveau de résolution, i.e. à chaque itération i du modèle discret et récursif, de nouveaux éléments *P, S* et *F* apparaissent dans des proportions définies de façon probabiliste, et des probabilités respectives p_i , s_i et f_i .

A la première itération *i*=1, la région initiale *R* de taille linéaire L est divisée en *n* sous-régions de taille linéaire $r_1 = \alpha L$, avec

$$n = \alpha^{-d} \tag{1}$$

où α est un facteur de réduction d'échelle inférieur à 1, et où np_1 sous-régions appartiennent à *P*, ns_1 sous-régions appartiennent à *S*, nf_1 sous-régions appartiennent à *F*.

A la deuxième itération i=2, l'ensemble *F* se divise à nouveau de façon similaire en révélant de nouveaux éléments solides et vides se ajoutant aux ensembles *P* et *S*, alors qu'est crée un nouvel ensemble *F* composé de $nf_1 nf_2$ regions de taille $r_2 = \alpha^2 L$. A chaque itération i, on a

$$r_i = \alpha^i L \tag{2}$$

Au bout de *i*=*T* itérations, la structure multiéchelle résultante est composée de pores et de particules solides (ensembles *P* and *S*) dont la composition, précisée à chaque itération, couvre toute une gamme d'échelles de taille, et un ensemble *F* composé de $n^T \prod_{i=1}^{i=T} f_i$ sous-régions de taille $r_T = \alpha^T L$.

Dans le cas le plus simple où le processus itératif est strictement autosimilaire, nous nous restreignons au cas particulier de probabilités p, s et f constantes à chaque itération *i*. On a bien sûr

$$p + s + f = 1 \tag{3}$$

et il nous arrive, pour simplifier la présentation de certains calculs, de parler, au lieu de probabilités, en terme de proportions exactes (p, s et f).

C'est ainsi que la définition du modèle multi-échelle PSF inclut comme un cas particulier celle d'un ensemble fractal *F* défini par itérations successives et créant à chaque itération *i* $(nf)^i$ sous-régions de taille linéaire, dont la géométrie est une reproduction de plus en plus petite de la géométrie initiale quelle qu'elle soit et dont la dimension fractale *D* est donnée par :

$$D = \frac{\log(nf)}{\log(1/\alpha)} \tag{4}$$

Tous nos résultats mathématiques ont été obtenus sous l'hypothèse de similarité stricte à chaque échelle, un cas de référence idéalisé ouvert à des extensions futures.

Figure 5. Définition formelle du modèle PSF

Nous avons montré que le modèle PSF, malgré sa présentation extrêmement simple dans le cas général (Figure 5), apportait un cadre formel unifié dans lequel se resituait l'ensemble des approches théoriques précédemment développées. Ceci a permis de reprendre pas à pas l'ensemble des résultats déjà publiés et de comparer de façon raisonnée les conclusions des uns ou des autres, dans la mesure où notre modèle était le premier à tenir compte de l'ensemble des composantes du milieu sol (pores, solides, agrégats, surfaces, densité, porosité …) en termes de structure.

A titre d'exemple, c'est ainsi que l'on a pu confirmer le lien établi entre une dimension fractale de masse des solides (avec une équation de variation de la masse avec la taille L d'un échantillon du type $M_L = L^d \rho_{PSF} + (\rho_r - \rho_{PSF})\left(\frac{L}{r}\right)^D r^d$), calculable à partir d'analyse d'images ou de mesure de densités d'échantillons, et l'expression analytique de la courbe de rétention d'eau (i.e la courbe $h(\theta)$ utilisée par Darcy-Richards) telle qu'établie par Rieu et Sposito [1991] (avec une équation du type $\theta + 1 - \theta_{\max} = \left(\frac{h_{\min}}{h}\right)^{d-D}$). Nous rejetons comme précédemment (section I.4), mais en le justifiant, le lien annoncé par d'autres auteurs avec l'expression de Brooks et Corey [1964] $\frac{\theta}{\theta_{\max}} = \left(\frac{h_{\min}}{h}\right)^{\lambda}$ couramment utilisée en science du sol. Par contre le modèle PSF permet d'expliquer malgré tout l'expression de Brooks et Corey [1964] à partir d'un cas particulier du modèle PSF, et de relier l'exposant de la courbe de rétention $\frac{\theta}{\theta_{\max}} = \left(\frac{h_{\min}}{h}\right)^{d-D}$ à une dimension fractale calculable à partir de mesures de surfaces de l'interface solide-pore (en utilisant des formules du type($S_L = \frac{ps}{p+s}\frac{2dn^{-d}}{(1-n^{-d}f)}(L^{d-1} - \left(\frac{L}{r}\right)^D r^{d-1})$) ou de distributions de taille des solides, telles qu'accessibles par simples tamisages mécaniques successifs ($N_S[r \geq r_i] = ns\left(\frac{\left(\frac{r_i}{L}\right)^{-D} - 1}{nf - 1}\right)$).

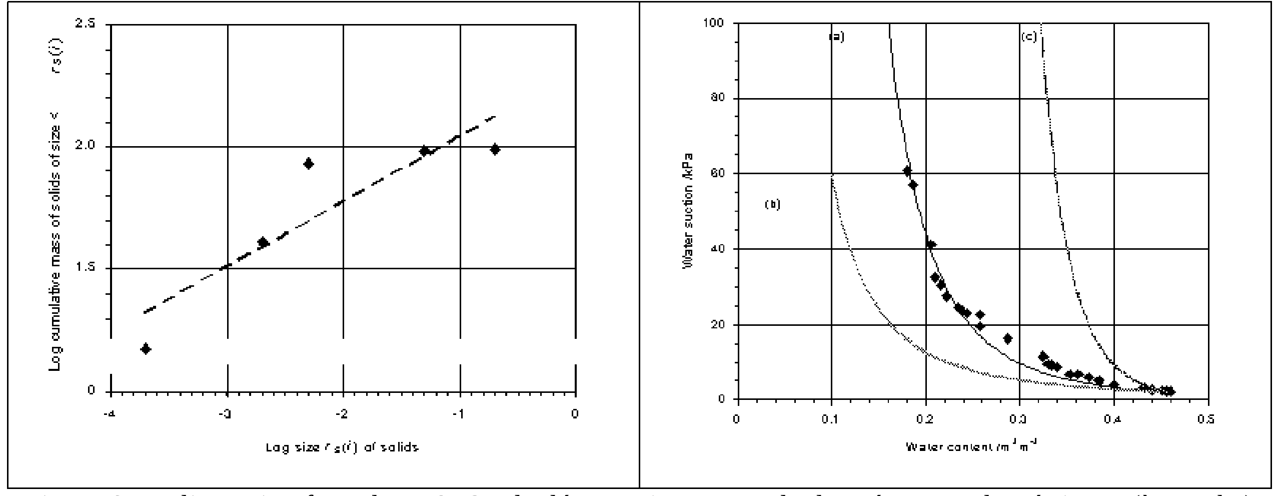


Figure 6. La dimension fractale D=2,73 calculée par ajustement de données granulométriques (à gauche) permet de prévoir l'exposant de la courbe de rétention (à droite) et de calculer la courbe (a) qui est a posteriori comparée avec les données expérimentales (Les courbe (b) et (c) correspondent aux bornes de l'intervalle de confiance [2,55;2,91] de l'estimation de D)

Les premiers résultats publiés [9] sont étonnamment satisfaisants (voir Figure 6). Mais de tels résultats ne concernent que… deux jeux de données, et je ne crois pas à une prévision aussi simple dans le cas général. En effet, la variabilité des types de structures est immense, les modèles fractals simplifiés ne peuvent être considérés que comme des cas d'école, et l'expression prévue pour la courbe de rétention d'eau par le modèle PSF dans sa formulation la plus générale $\theta + A - \theta_{\max} = A\left(\frac{h_{\min}}{h}\right)^{d-D}$ fait intervenir un 3[ème] paramètre A lié à l'extension du domaine autosimilaire.

Je cite ces résultats parce qu'ils servent d'illustration prometteuse pour le type d'approche modélisatrice que nous prétendons promouvoir, où un calcul établi à partir d'un modèle géométriquement cohérent permet d'inférer des relations déterministes entre une caractéristique structurale aisément accessible et une caractéristique de fonctionnement hydrique majeure, autrement dit de trouver une fonction de pédotransfert sur une base raisonnée et non statistique.

Toute une série d'articles successifs ont été publiés sur différents aspects du modèle PSF [10][9][2], des chapitres d'ouvrage [20], [22], des communications ont confirmé l'intérêt grandissant accordé à ce modèle [49] [47] [42] dont une l'an passé [48] en tant que conférence invitée par la Société Américaine d'Agronomy.

Par ailleurs l'approche PSF fournit un formalisme de milieux poreux multi-échelles extrêmement utile pour la construction de structures modèles très diverses. Elle permet d'envisager la construction de modèles tridimensionnels suivant différents types d'organisation suggérés par l'observation et les progrès de l'imagerie. Reste à trouver comment calibrer ces modèles par des données de distribution des éléments constitutifs de la structure et surtout par les indicateurs de connectivité qui sont à élaborer.

En ce qui concerne le travail de modélisation informatique de structures initié lors de ma thèse, cela permet d'une part d'imaginer de continuer la construction de modèles théoriques, seuls capables de rendre compte de la multiplicité des échelles intervenant dans un sol réel, mais en évitant désormais les limitations sur le type de géométrie utilisée dans ces modèles, et en particulier sans se restreindre comme auparavant à des constructions bidimensionnelles extrapolées à la troisième dimension En effet, les algorithmes mis au point pour des images réelles s'appliquent à un milieu poreux quelconque (section I.5), et peuvent de la même façon être utilisées sur des modèles de structures virtuelles considérées comme des images.

L'opération I.7 se situe toujours dans le domaine de hydropédologique, autour d'expériences de terrain visant à évaluer l'impact sur la restauration des sols dégradés de pratiques favorisant l'infiltration de l'eau de pluie dans des macropores d'origine biologique. La modèle développé vise à quantifier le mécanisme d'interception d'eau de ruissellement par les trous de surface, et consiste à coupler une modélisation classique EDP d'écoulement de surface avec une modélisation simplifiée de type réservoir des transferts hydriques dans le sol non saturé et un module d'infiltration original pour l'entrée dans les macropores

I.7 Modélisation EDP du ruissellement et interaction avec de l'infiltration dans des macropores [16]

Le contexte d'application est celui étudié par Joël Léonard, étudiant en thèse en hydrologie que j'ai encadré (co-encadrement J.L.Rajot, Dir. G.de Marsily). Il avait conduit préalablement des études approfondies sur des parcelles expérimentales au Niger pour étudier l'effet des pratiques traditionnelles de paillage sur la restauration des sols encroûtés au Sahel. La paille attire les termites en manque de nourriture, qui creusent des trous dans les croûtes recouvrant la surface des sols dégradés, ce qui a pour effet secondaire d'améliorer de façon radicale les capacités d'infiltration du sol et donc de limiter les pertes d'eau par ruissellement, au bénéfice d'une restauration de la végétation. Les études portaient sur des parcelles d'un m^2 soumises à des pluies naturelles ou artificielles. En complément des analyses statistiques qui mettaient clairement en évidence cet effet-trou, malgré le croisement avec d'autres variables explicatives, nous avons entrepris une recherche en modélisation pour contribuer à l'explication des processus de nature hydrologique, à leur quantification, et à l'extrapolation en dehors du cas d'étude.

En matière d'infiltration et de ruissellement à l'échelle d'une parcelle, j'avais développé en 1991 un programme [78] de simulation de l'infiltration et du ruissellement d'eau permettant de tenir compte de l'hétérogénéité des états de surface du sol (suivant différentes typologies de croûtes superficielles et végétation définies par une équipe Orstom), sur les infiltrations locales et donc sur le ruissellement. A ce titre j'avais couplé une simulation des écoulements verticaux dans le sol non saturé au moyen d'un modèle de Darcy-Richards paramétré différemment pour chaque maille et un modèle de simple report des quantités non infiltrés de maille en maille suivant la pente topographique. Il s'agit d'une approche classique en modélisation hydrologique distribuée pour ce qui est du report des ruissellements sans tenir compte des vitesses. Elle suffit pour mettre en évidence l'influence de la répartition spatiale des zones à fort et à faible infiltration sur le ruissellement global, celui ci ne pouvant en aucune façon être égal à une simple somme des ruissellements locaux.

La tendance actuelle en matière de modélisation du ruissellement est au renouveau des méthodes physiciennes, basée sur une résolution explicitement spatialisée des équations aux dérivées partielles régissant les mouvements de fluide sur une surface topographique. C'est la méthode que nous avons privilégiée, pressentant que les temps de séjour de l'eau en surface conditionnent les capacités de réinfiltration sur son parcours. On utilise donc les équations dites de Saint Venant (sous leur forme bidimensionnelle), ou encore les « shallow water equations » suivant la terminologie anglo-saxonne, à savoir une forme réduite et bi-dimensionnelle des

[16] Mes travaux 1991 et autour de la thèse de Joel Leonard (1997-2000)

équations de Navier Stokes pour les faibles épaisseurs d'eau, où l'on néglige notamment les accélérations verticales. Plusieurs méthodes de résolutions plus ou moins simplifiées coexistent et nous avons choisi la plus complète d'autant plus que nous disposions d'un code déjà élaboré [Estèves et al., 2000]. Par contre nous avons conservé un modèle simplifié des transferts hydriques dans le sol, basé sur la notion de remplissage d'un réservoir de sol saturé d'eau dont la limite (le front d'humectation) progresse au fur et à mesure du processus d'infiltration. C'est le modèle de Green et Ampt [1911] qui est une simplification drastique de Darcy-Richards sur deux couches, très utilisé par les hydrologues de surface. C'était d'autant plus justifié que le sol des parcelles était homogène, sableux, et initialement plutôt sec. Joël Léonard a adapté et modifié le code de résolution par différences finies des écoulements 2D en fonction de la topographie. Il a surtout introduit une composante originale d'interception par les macropores, un modèle empirico-physique de leur fonctionnement d'interception / infiltration. Pour cela il a fait l'état de l'art en hydraulique et en mécanique des fluides, et a monté une expérience de laboratoire pour quantifier l'effet « trou » isolément. Il en résulte que les macropores de surface se comportent comme des zones « ultra- infiltrantes » : ils ont des capacités d'infiltration bornées, mais les bornes ne sont quasiment jamais atteintes dans les conditions d'application du modèle. Les résultats concernant les parcelles expérimentales expliquent correctement la réalité et sont décrits dans plusieurs publications dont [7] [34] [24].

Le modèle complet ainsi conçu devrait être une référence utile pour d'autres applications potentielles, car quantifier l'influence des trous de termites sur la dynamique hydrologique, cela revient plus généralement à quantifier l'influence d'une répartition très hétérogène des capacités d'infiltration des sols à une échelle donnée, et quelques travaux exploratoires ont déjà été conduits en ce sens [Léonard, 2000].

L'opération I.8 est purement méthodologique et consiste à inventer un nouveau type de modélisation basée sur une approche particulaire ou multi-agent pour simuler les écoulements de surface avec l'espoir de mieux gérer des interactions de toute nature. Les résultats sont comparés avec l'approche EDP classique.

I.8 Le projet RIVAGE : modélisation multi-agent de processus hydrologiques de surface[17]

Parallèlement aux travaux utilisant des modèles d'écoulement classiques, dans la lignée des démarches de recherche méthodologique en vogue au LIA, et en relation avec des chercheurs en hydropédologie de mon unité qui mettaient en place un important protocole expérimental d'acquisition de mesures au Sénégal (programme Emire), j'ai cherché à imaginer une nouvelle méthode de simulation du ruissellement et de l'infiltration. En effet le couplage de modèles hydrologiques distribués avec une multitude d'autres phénomènes interagissant (infiltration dans des sols hétérogènes, trous, fossés, haies, barrages, réseaux d'écoulement préférentiels, et toutes sortes d'aménagements humains) pose de gros problème d'uniformisation des grilles spatio-temporelles utilisées pour la résolution des différents modèles dynamiques et d'uniformisation des données à prétraiter (agrégation ou interpolation sur la grille de référence choisie). J'ai alors conçu un prototype de simulateur où la dynamique centrale de l'eau était vue de façon résolument discrète (boules d'eau individualisées, en mouvement dans un espace continu), et où toute sorte d'interaction serait gérée en envoyant en temps voulu, et en un lieu donné, des événements en provenance de différentes cartes d'information géographique synthétiques (topographie, carte des sols, des états de surface, objets naturels divers). Les différents types de représentations géométriques restent donc indépendantes et mises en relation seulement à travers la perception qu'en ont les entités boules d'eau. Il s'agissait d'utiliser un formalisme de simulation distribuée type "multi-agents", selon l'appellation informatique, pour mieux gérer des interactions avec ces différents niveaux de représentation de la réalité, quitte à simplifier au maximum la représentation du ruissellement (déplacements de boules) et de l'infiltration (probabilités de disparition de boules). Le prototype de ce projet (Fig.5), que j'ai développé pour partie en collaboration avec Ch. Cambier, enseignant chercheur en informatique, a connu un succès réel lors de sa présentation aux Journées « Tendances nouvelles en modélisation de l'environnement » du programme PEVS du CNRS [30].

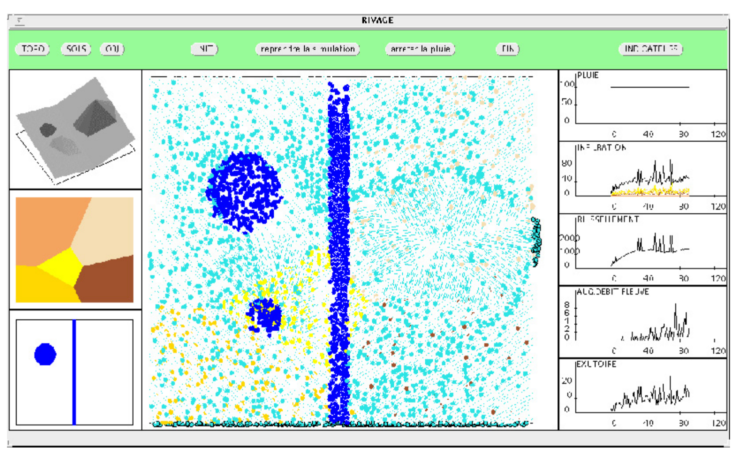


Figure 7. maquette du projet RIVAGE

[17] Mes travaux 1995-96 et autour de la thèse de David Servat (1997-2000)

A la suite de quoi j'ai lancé une longue entreprise d'approfondissement de l'idée initiale, en encadrant deux stages de DEA en informatique (Ch.Solignac, D.Servat) puis la thèse en informatique de David Servat (co-encadrement J.P.Treuil IRD, Dir. A.Drogoul P6). Les premières études se sont limitées presque exclusivement à la simulation du ruissellement sur une surface topographique donnée. Elles ont soulevé de nombreuses questions liées à la gestion d'un espace continu (que l'on souhaitait conserver comme garant d'une référence commune minimale pour les futures extensions), à la nécessité de gérer un grand nombre de boules et leurs relations de voisinage dynamique, au regroupement de ces boules dans des minimums locaux de la topographie d'une façon incompatible avec l'approche de représentation purement ponctuelle employée. Nous avions délibérément choisi le vocabulaire « multi-agent » [Ferber, 1984], un peu anthropomorphique, pour décrire le comportement des individus boules d'eau dans l'espoir d'y trouver des métaphores utiles pour l'imagination, et des principes de programmation novateurs, eux-mêmes issus de ces métaphores (acquaintances des boules, transmission de messages, buts, mémoire, auto-organisation, émergence de groupes, etc.). Trois ans plus tard, et après un travail de plus en plus collectif, nous en sommes arrivés à gérer correctement une population de boules d'eau, et des densités locales de boules, qui sont de fait tout à fait équivalentes à la « hauteur d'eau », classique et principale variable des modèles EDP d'écoulements d'eau sur une surface. Moyennant des emprunts à des méthodes physiciennes de mouvement de particules sur un support continu (méthodes SPH) [Zhu et al., 1997], les résultats de simulation des écoulements apparaissent tout à fait équivalents à ceux obtenus par résolution numérique des équations EDP de St Venant (voir Figure 8). Le travail de comparaison a été mené en collaboration étroite avec J.Leonard qui maîtrisait le modèle EDP, qui s'est lui aussi investi dans notre recherche « informatique », et c'est l'objet d'un article en cours de révision [1].

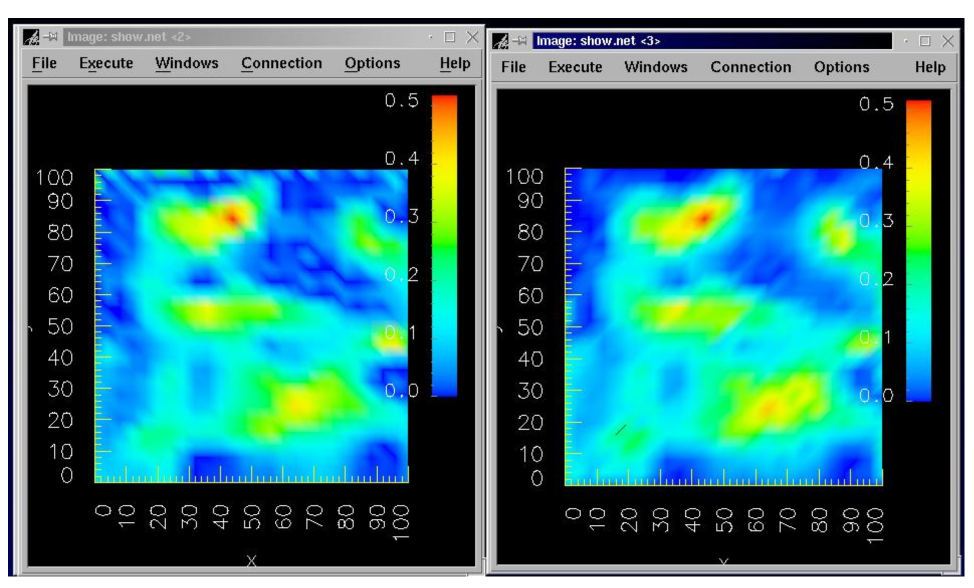


Figure 8 : Comparaison des champs de hauteurs d'eau simulés (pour du ruissellement sur une topographie d'un m2)par EDP (St Venant) et boules d'eau (Rivage)

Par ailleurs les algorithmes ont été couplés avec le modèle d'infiltration simplifié de Green et Ampt [1911]. Et l'ensemble a été récemment utilisé par une étudiante en thèse en hydrologie d'un laboratoire spécialisé en hydrologie (LTHE) pour simuler ruissellement et infiltration sur des parcelles enherbées expérimentales de la région de Grenoble [Shipman, 2002]. Les raisons de son choix étaient que le modèle particulaire posait moins de problèmes numériques que le modèle classique.

Sur le plan des bénéfices de la méthode particulaire/agent adoptée, on retiendra surtout deux points :

i) Les boules d'eau étant individualisées, rien n'est plus simple que de suivre leurs trajectoires

(comme dans les méthodes de particle-tracking [Delay et al., 1996] utilisées parfois pour simuler le transport de solutés sur un champ de vitesse déjà calculé classiquement, en alternative aux EDP de diffusion dispersion, et avec un bilan de masse correct par construction), et donc elles peuvent servir de traceurs dans la simulation
ii) Nous avons testé des idées de regroupements de boules en fonction de critères de similitude de trajectoires, ce qui permet de faire émerger des groupes que l'on peut associer grossièrement à des « mares » ou à des « chemins d'eau ». Le fait de pouvoir créer dynamiquement dans le simulateur de tels objets spatiaux, permet de définir des objets intermédiaires entre un niveau « microscopique » (celui du mouvement de fluide) et un niveau « macroscopique » (celui de la relation pluie / débit). En suivant l'évolution de ces objets « intermédiaires » (création, fusion, disparition), on peut imaginer introduire des critères de validation originaux pour la simulation de dynamiques spatialisées où la notion de suivi des structures spatiales dynamiques peut s'avérer plus pertinente qu'un simple critère des moindres carrés. Ces travaux sur la gestion de l'émergence de groupes dans une simulation multi-agent ont fait l'objet de plusieurs communications orales et écrites [25][27].

Dans le domaine hydro-pédologique, on espère des avancées pour la gestion de multiples interactions avec d'autres phénomènes et notamment dans le domaine de la modélisation de l'érosion des sols, où quelques simulations exploratoires ont déjà été conduites. Savoir si les interactions sont en fait plus faciles à gérer qu'avec l'approche classique reste une question ouverte. En effet nous avons débuté avec une approche qui se voulait très simple, avec des entités boules d'eau indépendantes entre elles et en mouvement suivant la pente, et, comme c'est souvent le cas en matière d'émergence d'idées à une époque donnée, avec une approche comparable à celle adoptée au même moment et indépendamment par d'autres équipes [Favis-Mortlock, 1998 ; Crave et Davy, 2001 ; Darboux et al.,2002]. Dans cette optique, il s'agit de disposer de modèles de ruissellement et / ou d'érosion simplifiant au maximum l'aspect physique, et servant de support au raisonnement. Nous avons continué avec une approche beaucoup plus physicienne, en tenant compte des interactions entre les boules et de leurs vitesses. Ceci nous amène à des résultats tout à fait comparables avec les méthodes de résolutions EDP des équations de Saint Venant, lorsqu'elles privilégient l'approche Lagrangienne à l'approche Eulérienne [Yoon et al., 1999; Dartus, IMF Toulouse, communication orale]. Et, sans se situer au niveau de complexité et de finesse de résolution imposés par les approches qui simulent une résolution directe des équations Navier- Stokes [Garcia-Sanchez et al., 1996], cela augmente les temps de calcul et diminue la souplesse des algorithmes.

Enfin, s'il est possible que l'approche par simulation informatique, bien que plus intuitive qu'une approche équationnelle physicienne, n'apporte pas fondamentalement in fine au domaine d'application hydrologique, on peut imaginer qu'en retour, les concepts physiciens introduits dans une simulation au départ purement « individu-centrée »- par exemple la notion de densité locale d'individus comme variable résultante des interactions individuelles- soient intégrés dans des simulations de dynamiques de populations appliqués à d'autres thématiques de recherche.

L'opération I.9 est un travail de recherche exploratoire par simulation pour trouver des informations sur la structure actuelle des aquifères alluviaux à partir d'une reconstitution de leur genèse, avec l'objectif de pouvoir mieux prendre en compte l'hétérogénéité du milieu naturel dans la modélisation des écoulements hydrologiques de sub-surface. On y fait référence à des principes de simulation multi-agents au sens d'une souplesse de conception d'un milieu virtuel comme un ensemble distribué d'entités en interaction, et les processus de sédimentation érosion y sont représentés par l'invention de règles de déplacement d'entités lithologiques en fonction du régime et de la morphologie du fleuve.

I.9 Simulation de la genèse d'une plaine alluviale : structure et hydrodynamique d'un aquifère[18]

Ce sujet est très proche de mes préoccupations scientifiques actuelles, parce qu'il a trait à la prise en compte de structures naturelles dans la modélisation de dynamiques hydrologiques, et, réciproquement, à la genèse de structures géologiques résultant de processus d'érosion et de sédimentation hydrologique. C'est celui d'une étudiante en hydrogéologie, Vanessa Teles, que j'ai co-encadrée avec le Prof. G.de Marsily, en tant que membre associée de l'UMR Sisyphe de Paris 6. Il s'agissait de simuler l'évolution d'une plaine alluviale au cours de milliers d'années, avec pour objectif de reproduire les structures particulières observées de nos jours dans les réservoirs aquifères alluviaux. En effet la répartition des différents composants lithologiques n'étant pas vraiment aléatoire et même plutôt fortement structurée à cause de l'historique de leur formation, et les traitements géostatistiques effectués à partir de multiples sondages dans l'aquifère ont du mal à reproduire sans trop la lisser l'hétérogénéité structurelle du milieu réel.

Nous avons délibérément laissé de côté toute approche de modélisation classique de l'hydrodynamique du fleuve, vecteur principal de l'érosion, du transport ou du dépôt des sédiments, pour des raisons évidentes d'échelle de temps et de méconnaissance des entrées précises que nécessite un tel modèle. Nous avons mis en œuvre une approche originale où des entités lithologiques sédimentaires, et des entités fictives érosives, telles les boules d'eau précédemment citées (section I.8), se déplacent dans le domaine d'étude en fonction de règles élémentaires simples [12]. Ces règles sont établies en fonction du régime du fleuve. Le déplacement des entités sédimentaires est par exemple de type marche aléatoire pour des régimes de fleuve en tresse ou fonction de la morphologie et de la position des bancs. Les entités suivent le tracé du lit du fleuve pour les régimes en méandres, et évoluent en fonction de sa morphologie (ex : création d'entités par érosion sur les parties convexes, dépôt d'entités sur les parties concaves des méandres). En retour le tracé du fleuve ou celui des bancs est dynamiquement modifié. Ce sont donc des règles directement établies en fonction de la connaissance du fonctionnement des structures naturelles telles qu'elles peuvent être observées qui pourraient intégrer à une échelle macroscopique dans l'espace et dans le temps des processus physiques hydrodynamiques ; elles ont pu être testées de façon satisfaisante sur l'évolution du tracé d'un fleuve pour lequel des données existaient sur un nombre d'années suffisamment long.

Par ailleurs, en ce qui concerne la simulation de la genèse de la plaine alluviale sur plusieurs siècles, nous avons seulement tenu compte de positions et de régimes du fleuve évalués en fonction de grands types de périodes climato-génétiques et en fonction des connaissances

[18] Autour de la thèse de Vanessa Teles (1996-1999)

disponibles sur une région donnée. C'est ainsi que tout un travail de reconstitution de la plaine alluviale du Rhône a été entrepris, et « validé » par comparaison avec des cartes établies empiriquement par un géographe, J.P.Bravard, expert en datations sur cette région [8].

Les simulations génèrent des structures réalistes mais qu'il reste difficile de conditionner exactement. Les aquifères simulés permettent néanmoins de procéder à des simulations d'écoulements dans une nappe en évaluant l'effet d'une structuration marquée en composants lithographiques hétérogènes [45] [46]. Le modèle d'écoulement utilisé est à nouveau un modèle EDP classique, basé sur la loi de Darcy, et dont les paramètres de perméabilité varient spatialement. A nouveau, cela risque de lisser les hétérogénéités et la question du type de modèle à mettre en œuvre reste tout autant d'actualité que celle de la mesure même ou de l'estimation de la structure spatiale.

Dans cette dernière section, je fais état de mes recherches en méthodes de modélisation au-delà d'un champ disciplinaire applicatif, qu'il s'agisse d'une approche transversale où l'on compare plusieurs modèles dynamiques similaires ou d'une approche véritablement multidisciplinaire où l'on conçoit un méta-modèle couplant des modèles dynamiques hétérogènes

I.10 Simulation informatique multidisciplinaire de dynamiques spatialisées[19]

Dans le cadre de mon accueil au LIA de L'Orstom, puis au sein de l'UR Geodes de Bondy, j'ai été amenée à suivre de près tout un ensemble de travaux conduits dans des disciplines variées allant de l'écologie ou à l'épidémiologie en passant par les sciences sociales ou la biologie. Il y a au moins deux façons de collaborer entre disciplines.

La première approche est en fait plutôt « transdisciplinaire ». C'est celle dont je reparlerai dans mes perspectives de recherches et qui vise, non seulement à partager des questions de recherche méthodologiques qui sont du même type dans plusieurs domaines, mais aussi à postuler que la circulation d'analogies d'une discipline à l'autre sera fructueuse en terme d'innovation sur les questions de recherche disciplinaire elles-mêmes... C'est dans cette optique que nous avons réfléchi sur l'analogie entre le modèle particulaire conçu pour représenter des flux hydrodynamiques (section I.8) et des modèles de dynamique de populations où les entités ne sont plus des boules d'eau se déplaçant en fonction de gradients topographiques mais par exemple des entités biologiques se déplaçant en fonction de gradients de température ou de nourriture disponible [61]. C'est ainsi que l'on a pu constater que les règles de transport de solutés par convection-dispersion dans l'eau sont modélisées par des équations ou des modèles particulaires parfaitement comparables à celles employées pour simuler des déplacements de poissons dans des champs de courants océanographiques. C'est enfin sur ce thème que nous avons publié un chapitre de réflexion méthodologique sur la simulation multi-agent de dynamiques spatialisées [21] dans un livre dont la traduction en anglais est prévue.

La deuxième approche, véritablement multidisciplinaire est la plus courante : on rassemble des connaissances différentes mais complémentaires parce que l'on a besoin de réfléchir ensemble sur un objet d'étude commun. C'est en général le cas de tous les projets de gestion intégrée sur un lieu donné, et de tous les systèmes dits « d'aide à la décision » pour lesquels il s'agit de gérer des bases de données hétérogènes, des expertises variées, et de construire des indicateurs globaux. Il y a en effet une forte « demande sociale » de multi-disciplinarité sur ce thème. Et il m'est arrivé de participer à des travaux de ce type.

Je citerai notamment ici un projet de simulation multi-agent du fonctionnement des systèmes irrigués à partir d'une région intensivement étudiée par toute une équipe Orstom pluridisciplinaire au Sénégal (hydropédologues pour le fonctionnement des sols, hydrologues pour le fonctionnement du fleuve, hydrauliciens pour le dispositif d'irrigation, agronomes pour les cultures, sociologues pour l'usage de l'eau et des terres [Boivin et al. Eds., 1995]). A la suite de quoi nous avons décidé de monter une opération de simulation de l'évolution du milieu en prévision de différents scénarios d'aménagement et d'extension des zones irriguées sur la

[19] En arrière plan 1995-2001, et autour de la thèse d'Edem Fianyo

région du Ngalenka [28][63]. J'ai participé à l'encadrement de deux étudiants en thèse sur ce projet (sous forme d'un comité de pilotage très resserré) : Jean Pierre Senghor devait analyser les différentes approches et les liens entre les différents modèles disciplinaires dans le cadre d'une thèse en gestion de l'Environnement (Co-encadrement P.Boivin, J.P.Treuil, Orstom et inscription de thèse au Canada), et Edem Fianyo, qui devait concevoir une architecture de simulateur adaptée au couplage de plusieurs modèles dans le cadre d'une thèse en informatique (Co –encadrement J.P. Treuil, P.Boivin, Orstom et Direction S.Pinson Paris 9). Nous avons d'abord travaillé sur l'ensemble des connaissances acquises et des modèles utilisés dans chaque discipline, assez travaillé pour constater les différences fondamentales de points de vue sur le réel (dont les maillages ou le découpage en objets spatiaux ne coïncident pas souvent). La tâche était d'autant plus difficile qu'il s'agissait de faire coopérer des modèles plutôt quantitatifs pour la représentation des processus physiques et plutôt qualitatifs sur les règles d'utilisation de l'eau et de gestion agricole des terres. Là où d'autres collègues [Poncet et al., 2002], dans un cadre comparable de gestion intégrée, avait décidé de concevoir à zéro un nouveau modèle utilisant les connaissances acquises, nous avons choisi de travailler en ne changeant pas les modèles existants mais en définissant des « interfaces de communication ». Nous ne sommes pas allés très loin sur le couplage « milieux et sociétés » puisque JPierre Senghor a abandonné sa thèse pour des raisons personnelles qui l'empêchaient de travailler correctement. Nous avons alors continué avec Edem Fianyo en concevant d'abord un couplage faible entre les modèles tels qu'utilisés par les collègues du Sénégal en hydropédologie : à savoir des logiciels indépendants de transfert hydrique et de transport 1D dans les sols non saturés de transfert/transport 2D dans la nappe. Coupler « faiblement » consiste à faire communiquer des programmes indépendants par des envois d'informations filtrées par des interfaces de communication, par opposition à un couplage fort qui consiste à modifier le code source des programmes et à uniformiser les modes de représentation. E.Fianyo a alors conduit ses recherches sur le strict plan des architectures informatiques à mettre en œuvre, et a produit des résultats très intéressants notamment sur la gestion du temps [26] et la représentation de l'espace dans des applications distribuées où l'on couple plusieurs modèles dynamiques, ayant leur propre gestion interne, tournant éventuellement sur des machines différentes, etc. [Fianyo, 2001].

Pour revenir à un sujet plus « disciplinaire » et au domaine hydropédologique il est clair qu'il est sans doute plus rapide, en l'absence d'outils spécifiques, de coupler deux modèles assez voisins « en entrant dans les codes ». Citons par exemple un article récent à ce sujet [Morita et Ben chie, 2002], qui présente le développement d'un code numérique couplant un modèle EDP Saint Venant pour représenter les écoulements 2D en surface et un modèle 3D de Darcy-Richards pour les écoulements (saturé et non saturé) en sous-sol. Il reste dommage que l'on reécrive sans cesse des modèles déjà existants parce que la communication entre différents modèles comme entre différents concepteurs reste difficile. Rappelons que les concepts à partir desquels nous avons réfléchi au couplage de modèles se réclamaient de la simulation multi-agents où l'on parle d'intelligence collective, de distribution des tâches, de coordination, de coopération pour faire communiquer des programmes...

C'est ainsi que se termine la description des recherches que j'ai conduites, avant d'entamer une courte réflexion de nature plus épistémologique.

II. Une conception du rôle de la modélisation en recherche scientifique

II.1 Modélisateurs, modèles et modélisation

Il apparaît clairement dans tout ce qui précède que l'essentiel de ma recherche a consisté à concevoir des modèles informatiques et mathématiques « originaux » dans un contexte eau-sol et que je me présente comme une « modélisatrice ». C'est à partir de ma propre expérience que j'aborde ici une réflexion d'épistomologie descriptive.

Qu'est-ce qu'un modélisateur ? Au sens qu'en donne Pavé [1994], c'est quelqu'un qui se situe entre théories et applications dans la (ou les quelques) disciplines où il s'investit. La modélisation n'existe pas à l'université en terme de discipline. Ceux qui font un usage intensif des mathématiques et plus récemment de l'informatique pour représenter le monde réel et les lois qui régissent son évolution sont généralement appelés des physiciens. On emploie d'ailleurs souvent, lors de colloques ou dans des ouvrages, l'appellation « physique du sol » pour parler de travaux proches des miens en ce qui concerne la modélisation des écoulements d'eau dans les sols ou à leur surface. Dès que l'on étend un modèle à des milieux naturels plus complexes (si j'incluais des composantes biologiques par exemple dans la modélisation de la structure et du fonctionnement des sols, ou bien lorsque je cherche des méthodes de modélisation du ruissellement qui permettraient d'introduire différentes interactions avec des couches de végétation et des aménagements anthropiques) le mot physique devient moins approprié. On peut parler de physique des particules ou encore d'astrophysique, mais à l'échelle humaine, qui est celle qui nous apparaît souvent comme la plus complexe, on parle à la rigueur de géographie physique mais rarement de physique (c'est en géographie que les travaux de modélisation de la genèse d'une plaine alluviale de V.Teles ont été publiés). Ce n'est donc pas une question d'échelle, mais sans doute une question de complexité du milieu[20]. Les physiciens peuvent se pencher sur le problème de la circulation de fluides sur une surface rugueuse fractale [de Gennes, 1985], sur un calcul de perméabilité d'un grès [Katz et Thompson, 1985], sur la loi de Darcy comme prise de moyenne en milieu poreux hétérogène [Whitaker, 1986] ou sur des méthodes de modélisation en mécanique des fluides [Boon, 1992], mais in fine, dès que l'on travaille sur la modélisation des systèmes naturels et a fortiori sociaux, le terme qui me semble le mieux approprié semble « modélisateur » plus que « physicien ». Ce qui n'empêche pas certains physiciens de « déborder » de plus en plus de leur «territoire » d'origine (ex : quantification des phénomènes de ruissellement et d'érosion des sols [Crave et Davy, 2000], modélisation des villes [Schweitzer, 1998], modélisation des réseaux sociaux [Newman, 1999 ; Solomon et al., 2000]). Ils se placent dans le cadre d'un nouveau type de modélisation, plutôt trandisciplinaire, qui traite de ce qu'il est désormais convenu d'appeler « systèmes complexes » (voir section II.2.4). Ils le font alors généralement dans un cadre conceptuel fort qui est caractéristique de la physique théorique, mais en partageant des méthodes de simulation exploratoire (voir section II.2.1), des principes d'émergence de phénomènes observés expliqués à partir d'interactions locales (voir section II.2.2), des formalisations mathématiques mais aussi algorithmiques (voir section II.2.3) avec des chercheurs de tout horizon. Les physiciens Schweber et Wächer [2000] attribuent cette

---

[20] Physique, Définition du dictionnaire Hachette : *Science qui étudie les systèmes réels simples en vue de formuler les lois générales qui décrivent les phénomènes observables. Par système simple, il faut entendre un ensemble d'objets et de champs de force caractérisé par un nombre de paramètres suffisamment petit pour qu'il soit possible d'en faire un inventaire complet, Science constituant une discipline scolaire et universitaire. (Dans quelques expressions : qui concerne la nature)*

généralisation de l'activité de modélisation à une révolution informatique et écrivent « the computer has thus levelled the field of doing certain kinds of theoretical modelling ».

Qu'est-ce qu'un modèle ? J'appelle modèle toute représentation fictive et simplifiée des milieux et / ou des mécanismes réels, construite par l'esprit humain pour décrire et analyser la réalité, et si possible comprendre et contrôler son évolution. D'un certain point de vue, tout humain construisant une représentation du monde réel fait un modèle : tout jeu d'enfant imitant la réalité, tout schéma faisant une synthèse d'observations, toute carte décrivant un milieu, tout raisonnement permettant d'expliquer des évolutions est un modèle. A fortiori tout chercheur utilise et conçoit des modèles. On peut ainsi construire effectivement des « modèles réduits » de la réalité et faire des simulations analogiques (ex : simulateur de vol, simulateur de pluie, représentation effective d'un milieu poreux par un réseau de résistances électriques [Fatt, 1956]), ou simuler une dynamique économique ou sociale réelle par des jeux de rôle [Bousquet et al., 2002]. Curieusement on pourrait alors voir par extension toute expérience de laboratoire ou de terrain en conditions contrôlées comme un modèle d'étude de la réalité. Mais je parlerai ici de modèles par opposition à toute représentation matérialisée en me référant à des représentations purement abstraites, où un système réel est représenté par un système formel mathématique ou informatique, dont on peut identifier les paramètres. Et je parlerai de modèles dynamiques et calculables, au sens où l'on peut « simuler » les changements d'états du système modélisé en effectuant un ensemble de calculs, avec une ambition avouée de quantification des évolutions possibles.

Qu'est ce que modéliser ? Il y a deux façons de modéliser la réalité. L'une consiste à utiliser des modèles existants, à identifier et à mesurer leurs paramètres, à les tester voire les critiquer, et à s'en servir en termes de prévision si possible. L'autre consiste à inventer un modèle, soit parce qu'il n'en existe pas sur son sujet d'étude, soit parce que l'on considère que les modèles existants sont insatisfaisants. C'est cette dernière activité de création de modèle que j'appelle véritablement « modélisation ».

Il est rare qu'un modèle soit tout à fait satisfaisant. Un modèle est toujours « faux », puisque par définition, c'est une schématisation de la réalité. Tout modèle a une durée de vie provisoire et est fait pour être un jour remplacé par un autre, sauf que certains durent plus que d'autres, comme le modèle de Navier-Stockes en mécanique des fluides ou bien les modèles astronomiques. En général, nous nous contentons à juste titre de chercher à améliorer la mise en œuvre technique des modèles éprouvés, et à les modifier en y rajoutant des variantes ou des extensions (exemple rajout de la déformabilité dans le modèle de Darcy-Richards (I.3), passage des modèles de pores parallèles aux modèles en réseaux (I.4), rajout d'une composante trou pour le modèle d'écoulement de Saint-Venant (I.7), adaptation des paramètres du modèle d'écoulement dans la nappe à l'hétérogénéité du milieu (I.9), etc.). Et quand nous avons tenté un nouveau type de modélisation comme avec le projet Rivage, c'est par comparaison avec un modèle reconnu que nous avons jugé de la validité des résultats (I.8). En effet rien n'est plus difficile que de changer une façon de voir le monde, et il ne faut pas réinventer la roue. Et quand il faut répondre au plus vite à une question de recherche « opérationnelle », il est hors de question d'inventer un nouveau modèle, car c'est un processus long et hasardeux. Par contre quand il s'agit de mieux comprendre la nature des mécanismes pouvant expliquer des phénomènes observés, et de tester des hypothèses de fonctionnement, avec un objectif de prévision seulement à long terme, la création de modèles qui servent aussi d'aide au raisonnement (cf. les modèles de structures en I.6) m'apparaît faire partie intégrante d'une démarche de recherche scientifique. J'aborde en section II la question du comment le faire, et en section III celle du pourquoi.

II.2 Méthodes de recherche et recherches de méthodes

La question qui se pose souvent en particulier lorsqu'on passe beaucoup de temps, comme c'est le cas dans notre groupe de recherches multidisciplinaire, à discuter « méthodologie », est de savoir si on privilégie la question de recherche que l'on se pose (par exemple le lien entre des caractéristiques structurales et caractéristiques hydrodynamiques des sols, ou la compréhension des mécanismes du ruissellement, ou ceux de la transmission du paludisme) ou bien la recherche de méthodes de modélisation (modélisation informatique ou mathématique, modélisation multi-agents ou particulaire). A première vue, on peut penser qu'il vaut mieux travailler le fond que la forme, que les questions de méthode (cf. débats sur la programmation objet, agent ou procédurale, sur les choix d'espace continu ou discret, au même titre que ceux sur la méthode d'apprentissage de la lecture ou les querelles entre maths modernes ou anciennes etc.) sont secondaires devant un objectif de découverte et qu'elles restent purement techniques. La volonté de choisir plutôt certaines méthodes que d'autres (par exemple lorsque nous privilégions les méthodes particulaires, multi-agents ou individu-centrées dans nos simulations de dynamiques de flux) relèvent tout autant d'une appartenance à une communauté scientifique, à une école de pensée que d'une nécessité absolue de procéder ainsi. On peut vouloir programmer objet[21] ou utiliser des fractales par un effet de mode… On peut voir dans la comparaison de méthodes particulaires ou EDP (Ex : boules d'eau et St Venant) une curiosité intellectuelle futile tant que les résultats de simulation sont identiques. Ainsi peut-il y avoir danger de sclérose au sein même d'une démarche d'innovation.

Malgré tout, je reste convaincue que la réflexion sur la méthode fait partie intégrante du processus de recherche. Non seulement les résultats dépendent souvent d'un choix apparemment purement technique (c'est bien connu pour ce qui est des pas de temps et d'espace, c'est vrai aussi pour les choix de simulations synchrones ou asynchrones et pour tout choix algorithmique où chaque ligne de code a forcément un effet[22]). Mais ils dépendent aussi de la façon de représenter un milieu donné, par un espace continu ou discret, de le découper en objets ou de le mailler, de choisir telle échelle ou telle autre, d'y simuler des processus faisant varier à chaque instant des variables globales ou des événements et des règles de changement d'état, etc... aucun choix n'est anodin, cela fait partie de la façon même d'exprimer la question de recherche que l'on se pose, ce qui est toujours plus difficile que prévu, et donc c'est apporter déjà des éléments de réponse ou au minimum des voies de recherche.

C'est pourquoi je souscris à la tendance contemporaine qui vise à rapprocher la recherche de méthodes de modélisation et la recherche sur les questions thématiques à propos d'un même objet d'étude.

---

[21] A ce propos, une anecdote : j'avais choisi de programmer « objet » Il se trouve que j'ai eu une remarque d'un spécialiste sur mes générateurs de nombres aléatoires qui provenait du langage C classique (fonction rand() du langage C) alors qu'il existait une classe objet dans mes outils de développement C++ spécialisée sur les nombres aléatoires. J'ai donc passé une semaine à intégrer le nouveau point de vue sous forme de classes, instance d'objet et méthodes …pour m'apercevoir que le résultat était absolument identique, car la classe C++ faisait tout simplement appel à la fonction rand() de C !

[22] Citons un exemple personnel sur l'usage d'une méthode inverse de Marquart : j'avais publié des résultats dans un papier WRR en 96. Reprenant mon code SAS (le logiciel statistique de référence dans beaucoup de publications) par hasard et le refaisant tourner sur mes exemples passés à titre de test, je m'aperçois que les résultats ne sont plus les mêmes avec la nouvelle version, mes je retrouve bien mes anciens résultats après avoir récupéré la version précédente du logiciel. Aucune modification n'était notifiée dans le mode d'emploi, sans doute un simple détail de code mis à jour, et chacun sait que les algoritmes d'optimisation y sont très sensibles.

II.2.1 La simulation comme outil exploratoire pour la modélisation

« Although the art of mimicking and modeling may be traced back to the beginning of civilization, with the emergence of computers, a few decades ago, the art of modeling and simulation experienced a remarkable transformation... » [Ghosh, 2002] et de plus en plus de colloques scientifiques sont dédiés à la simulation sous toutes ses formes (ex : Rencontres francophones de Rochebrune 2003).

En effet les apports récents de l'informatique, avec une capacité de stockage et de traitement d'informations dont la croissance semble sans limites, avec la capacité de résolution numérique d'équations mathématiques classiques dans des conditions de plus en plus étendues, avec l'extension de la capacité d'expression des langages de programmation [Ducourneau *et al.*, 1998], ouvrent aux modélisateurs la possibilité de simuler des situations réelles de plus en plus complexes[23].

Laissons à part la simulation numérique de processus dynamiques déjà modélisés, par exemple la résolution numérique d'EDP, pour laquelle la représentation graphique reste une aide non négligeable pour le modélisateur (voir I.2), mais non pour concevoir le modèle puisqu'il existe déjà. Et intéressons nous à ce que je nomme des simulations exploratoires, c'est-à-dire à la programmation de milieux virtuels - dont on ne sait pas à l'avance ce qui va le mieux les caractériser-, et à la programmation de processus virtuels -sur lesquels on veut surtout émettre des hypothèses-.

J'ai commencé plusieurs de mes recherches par une construction de milieux virtuels sur ordinateur, un peu comme j'imagine que l'on peut construire un jeu sur ordinateur (ex : une ville du jeu Sim-city). La construction est intuitive, la technique employée consiste à savoir programmer et dessiner : une structure de sol comme un assemblage aléatoire de vides et de solides, bi-dimensionnelle parce que c'est plus simple (I.4) ; une plaine alluviale comme un empilement de cubes lithologiques (I.9); une rivière rectiligne, une mare et une montagne dans la maquette de Rivage (I.8). Les choix de représentation sont multiples et comportent tous une part d'arbitraire, mais une fois le choix effectué, on ne revient pas souvent en arrière, ne serait-ce que pour des questions de temps de (re)programmation. Il y a toujours des « raisons » sous-jacentes au choix que l'on fait en matière de simulation : un ensemble de voxels pour les images tridimensionnelles de sol parce que c'est la forme des données tomographiques (I.5), un ensemble de zones polygonales aléatoires pour les structures de sols de ma thèse (parce que j'avais un algorithme disponible, comme d'autres utilisent des grilles carrées ou hexagonales parce qu'elles sont déjà programmées) (I.4), un milieu continu pour Rivage parce que je pensais que c'était le meilleur choix pour faire la liaison entre plusieurs types de représentation géométriques en interaction (I.8). Mis à part dans ce dernier cas, les choix en matière de « réalité virtuelle » me paraissent très guidés (et pas seulement en ce qui me concerne) par les outils de programmation disponibles, les exemples de simulateurs que l'on a vus ailleurs[24], et une pure intuition concernant les paramètres et les lois qui pourraient caractériser a priori un milieu donné et son fonctionnement, puisque c'est justement ces lois sur lesquelles on veut pouvoir émettre des hypothèses.

---

[23] La modélisation de la complexité reste " d'une part de l'ordre d'approches formelles et outils mathématiques nouveaux en plein foisonnement, d'autre part de l'ordre de concepts nouveaux caractérisant l'informatique actuelle, en plein essor elle aussi ", les approches par simulation sur milieux virtuels restant pour l'instant plus " maniables " (Frontier, 1997).

[24] Nous continuons actuellement une réflexion sous forme d'un groupe de travail entre plusieurs équipes sur les outils de simulation à développer pour d'une part réduire les temps de programmation des simulateurs, d'autre part pour mettre en parallèle tout un ensemble de choix en matière de représentation de l'espace et du temps dont on peut soupçonner qu'ils ne sont pas sans conséquence sur les résultats des simulations, voir prospective III.1.

Le danger de la simulation de telles expérimentations sur mondes artificiels est d'aller trop loin dans l'hyperimaginaire ou au contraire trop loin dans l'hyperréalisme [Treuil et Mullon, 1997]. Ces deux positions extrêmes peuvent avoir des résultats intéressants dans le cas d'un jeu sur ordinateur, mais elles sont difficilement soutenables dans le cadre d'une recherche scientifique. En effet, le but des simulations exploratoires est, pour moi, de conduire vers un modèle. Au premier sens du mot modèle, toute simulation pourrait être vue comme un modèle, et même généralement un modèle dynamique. Au sens des modèles formels, paramétrables et permettant de raisonner qui m'intéressent (voir II.1), cela n'est pas souvent le cas. Lorsque l'on veut se rapprocher d'une vision beaucoup trop réaliste de la réalité, on est tenté de rajouter non seulement beaucoup trop de paramètres, mais beaucoup de détails informels et non paramétrables inclus dans le code, et il devient impossible de raisonner et à plus forte raison de faire des analyses de sensibilité sérieuses. Au contraire, lorsque l'on conçoit un modèle formel très abstrait, il est beaucoup plus facile de contrôler la simulation mais on prend le risque d'avoir du mal à interpréter les résultats de sa simulation imaginaire en termes de compréhension des phénomènes réels.

Et donc malgré toute la part d'arbitraire dans toute opération de simulation, je pense que le fait de simuler un peu au hasard de son intuition permet de se poser beaucoup de questions sur son objet d'étude et son sujet de recherche, et aide à la formalisation ultérieure d'un véritable modèle. C'est ce qui s'est passé pour moi entre les simulations de structures de sols virtuelles (I.4) et l'invention du modèle de structure PSF à trois paramètres (I.6). Je crois à un aller-retour entre la simulation et le modèle, et c'est ainsi que j'ai l'intention de conduire à nouveau d'autres types de simulations exploratoires autour du premier formalisme obtenu (voir III.2).

En résumé, la simulation informatique a pour moi une forte valeur heuristique[25]. Raisonner sur une simulation informatique, c'est comme s'aider d'un dessin pour une démonstration en géométrie, c'est parfaitement inutile en théorie, mais indispensable en pratique. « Simulation is a rich inferential process, and not simply a "number crunching" technique » [Winsberg, 2001].

II.2.2 Simulation multi-agents

Les simulations multi-agents sont un type particulier de simulation informatique. Le terme « multi-agent » provient la communauté informatique. Les systèmes multi-agents [Ferber, 1995] sont nés de l'idée d'utiliser des métaphores sociales ou éthologiques pour imaginer et mettre en œuvre certaines architectures de programmes en Intelligence Artificielle. Une part de la recherche s'intéresse aux courants des agents dits "réactifs" s'appuyant sur des métaphores biologiques [Drogoul *et al.*, 1995]. Une autre part s'intéresse aux agents cognitifs et vise à formaliser des capacités de prise de décisions dans des contextes de coopération et/ou de compétition, des capacités de communication et de construction de représentations élaborées. L'utilisation de ces formalismes pour la simulation de processus sociaux basés sur l'interaction de décisions individuelles (individualisme méthodologique) est un retour assez naturel. Une part de l'expérience du groupe de recherche auquel j'appartenais (LIA) s'est construite à partir de l'application des systèmes multi-agents à la modélisation et à la simulation de contextes sociaux où interviennent à la fois la dynamique d'une ressource et des processus de décision individuels ou collectifs en œuvre dans son exploitation [Bousquet *et al.*, 1993]. Dans le cas de simulations de dynamiques de populations biologiques, on s'inspire plutôt du courant dit « réactif » avec des notions de décision individuelles et d'interactions qui restent assez naturelles. Ceci dit on parle plutôt en biologie théorique [Langton, 1994] de simulations individus-centrées (IBM, Individual-based modelling) [De Angelis et Gross, 1992]. Nous avons

[25] Ce qui est maintenant prouvé ne fut jadis qu'imaginé William Blake, the marriage of heaven and hell (in HdR Drogoul 2001)

aussi employé cette terminologie pour des simulations particulaires dans la modélisation de milieux et processus physiques, où comme dans les systèmes multi-agents réactifs, le concept d'émergence [Jean, 1997] de comportements macroscopiques à partir de celui d'entités individualisées en interaction locale prend tout son sens. Mais nous avons peu à peu précisé, pour ce qui nous concerne, l'apport de la recherche sur les agents [29] [52] pour la simulation individu-centrée ou particulaire en général.

Une première approche, classique, consiste à faire de chaque objet de la simulation un agent. Les considérations développées pour les agents cognitifs ne sont évidemment pas pertinentes (échanges de messages, coopération, etc.), dès lors que l'on est amené à mettre en œuvre un grand nombre de particules par exemple quelques dizaines de milliers -. Dans ces situations une trop grande de complexité interne serait prohibitive du point de vue des calculs et, de toutes façons, difficile à interpréter. Le courant des agents réactifs, des agents massifs [Cardon, 2000] et les formalisations d'inspiration physico-mathématique [Kiss, 1997; Schweitzer, 1997] dans lesquelles des particules dotées d'états internes se déplacent sous l'effet de champs de potentiels qu'ils contribuent parfois à créer, constituent des pistes plus appropriées (voir par exemple les gradients topographiques ou de hauteurs d'eau en I.8) [21].

Une seconde approche a retenu également notre attention. Elle vise à utiliser les agents sous leur acception cognitive, mais sur un plan d'ingénierie informatique : il s'agit alors de faire coopérer des agents *ad hoc* n'ayant pas nécessairement d'interprétation dans la réalité pour assurer des tâches nécessaires à la bonne marche des simulations; par exemple des « agents de contrôle » assurant la coordination entre modèles partiels, situés sur des machines différentes, et échangeant, à des rythmes temporels ajustables, données et résultats sous forme de messages [26] ; ou encore des « agents médiateurs » chargés de gérer les interactions entre les particules simulées et leur milieu [Servat, 2000].

La terminologie « simulation multi-agents » est utilisée par toute une communauté de chercheurs [Bousquet et al., 1998 ; Daniels, 2000], faisant abondamment usage de simulations exploratoires, utilisant des concepts de programmation dont l'aspect agent est plus ou moins marqué. Ils collaborent avec des chercheurs en informatique dont la recherche en terme d'architecture de « systèmes multi-agents » ne cesse de progresser et d'évoluer en France [Ferber, 1994 ; Cardon, 2000 ; Drogoul, 2001, etc.] comme à l'étranger[26]

II.2.3 Modélisation mathématique et modélisation informatique

Dans un modèle mathématique, tous les paramètres sont explicites, et les résultats du modèle sont prouvés et exprimés en fonction de ces paramètres, c'est un modèle formel et paramétrable par excellence. Le seul problème, c'est que les modèles mathématiques n'ont pas toujours de solution, et que l'on doit très souvent recourir à des simulations numériques [Ramzi, Arino et al., 2001]. De plus, le milieu réel n'est pas toujours aisément mathématisable.

Un modèle informatique peut traiter des cas beaucoup plus complexes, mais le passage d'une simulation exploratoire à un véritable modèle est discutable. En effet, malgré la notion de preuve d'un programme [e.g. Granville et al., 1994], et même si les paramètres du modèle sont bien identifiés, on ne peut jamais prouver que les résultats sont totalement généraux, puisque l'on peut que travailler dans un univers fini (espace-temps fini, nombre de réalisations finis, etc.) Il n'empêche que l'on peut explorer des domaines suffisamment larges pour accorder crédit aux simulations. C'est ainsi que l'on peut calculer mathématiquement certains seuils de

[26] (voir par exemple (voir par exemple http://www.swarm.org pour la simulation multi-agent ou http://www.multiagent.com/) pour tout type de système multi-agent

percolation [Stauffer, 1986] et vérifier la concordance avec ceux que l'on avait trouvés initialement par simulation.

On oppose souvent les deux approches. Ma modeste expérience laisse penser qu'elles sont parfois équivalentes et souvent complémentaires.

Dans la comparaison d'un modèle EDP et d'un modèle particulaire (projet Rivage, I.8), on est obligé d'une part de recourir à des simulations numériques pour résoudre le modèle équationnel et d'autre part de formaliser le modèle de simulation informatique. Ils deviennent quasi équivalents. Comme dans le célèbre cas du modèle informatique de gaz sur réseaux [Boon, 1992] -pour lequel on a vraiment montré de façon probabiliste une équivalence potentielle avec une résolution des équations de Navier-Stokes-, on peut espérer que le modèle informatique est plus souple pour l'ajout d'interactions supplémentaires et la conduite de simulations exploratoires.

Dans l'exemple de la modélisation des structures de sols et de leur comportement hydrique (I.4 et I.6), seul le calcul mathématique permet de trouver l'expression analytique de la courbe de rétention en milieu fractal et le modèle informatique ne peut que tester sa validité dans le même contexte ou pour diverses extensions. Par contre le phénomène d'hystérésis de la courbe n'est mis en évidence que par simulation sur le réseau, même si on peut a posteriori démontrer mathématiquement son existence (mais sans quantification possible). D'autre part le modèle informatique, justement parce qu'il ne peut traiter que des cas finis, a permis de mettre en évidence des erreurs de raisonnements mathématiques en ce qui concerne les bornes du domaine d'étude [14].

De façon plus générale, je pense que les mathématiques doivent servir de contrôle aux modèles informatiques, en s'attachant à démontrer les résultats obtenus, chaque fois que c'est possible, c'est-à-dire dans quelques cas particuliers. On peut aussi imaginer concevoir des modèles mathématiques de la réalité en se servant des simulations informatiques comme des médiateurs.

II.2.4. Modélisation de systèmes complexes

Le projet Geodes se situe dans le cadre de la conception de modèles permettant d'appréhender la complexité des systèmes naturels et sociaux. C'est là un domaine en pleine effervescence. Cette tendance se manifeste à la fois par l'émergence de laboratoires spécialisés et par le foisonnement d'ouvrages [e.g. Nicolis et Prigogine, 1989 ; Weisbuch, 1989 ; Delahaye, 1994], de revues spécialisées sur ces questions ou de dossiers dédiés aux multiples facettes des sciences de la complexité dans des revues généralistes[27].

Le terme de "complexité" se réfère ici à des réalités de plus en plus intriquées et dont la dynamique est en conséquence de plus en plus difficile à contrôler : il s'agit de comprendre le fonctionnement de milieux naturels fortement hétérogènes, de faire ressortir la dynamique globale de systèmes dont les déterminismes et les forçages sont multiples, d'intégrer des connaissances acquises à des échelles et selon des points de vues variés. La tâche assignée à la modélisation consiste à démêler l'écheveau de cette complexité et à la restituer en ne conservant que ce qui est essentiel.

Les modèles de « systèmes complexes » sont en général paradoxalement très simples. Beaucoup mettent en œuvre un principe d'émergence, celui dont se réclament aussi les simulations multi-agents [Ferber, 1994] : C'est ainsi que nombre de travaux en physique statistique ou en biologie

[27] Voir le numéro spécial consacré à la problématique de la complexité en avril 1999 par la revue Science, ou encore, dans le Monde des débats, Décembre 1999, l'article intitulé "des particules au social, l'OPA de la complexité"

théorique ont montré qu’il était possible de faire émerger par simulation des comportements apparemment complexes, observables à une échelle macroscopique donnée, à partir d’entités simples agissant selon des règles de comportement individuel simples à une échelle microscopique [May, 1977; Stein, 1989]. Ces modèles simples, comme par exemple de nombreux cas d’automates cellulaires [Langlois et Phipps, 1997] montrent souvent un fort potentiel explicatif de phénomènes complexes observés [28], tant dans le domaine de la complexité organisationnelle [Werner, 1999 ; Wilson, 2002, Pascual et al., 2002] que celui de la complexité fonctionnelle [May, 1977]

C’est dans ce domaine des dynamiques complexes qu’a eu lieu la révolution conceptuelle liée à la découverte de simulations générant des dynamiques apparemment totalement imprévisibles, c’est le domaine des « non-linear dynamics » menant au chaos [Bergé et al., 1984]. Les évolutions temporelles à partir de deux états infiniment voisins peuvent y être totalement divergentes, et même si le modèle est très simple. C’est ainsi que l’effet de processus déterministes sur des systèmes dont l’évolution peut être exactement décrite par un modèle peut apparaître totalement erratique. Bien qu’il s’agisse d’une remise en cause totale des capacités de la plupart des modèles à prévoir voire à prédire l’avenir, la théorie du chaos déterministe permet néanmoins de cerner l’ensemble des évolutions possibles d’un système dynamique. Celles-ci peuvent être représentées dans un espace des phases où apparaissent des structures qui décrivent géométriquement l’ensemble des états possibles. Ces « attracteurs étranges » sont généralement des fractals. C’est ainsi que les fractales [Mandelbrot, 1983 ; Gouyet, 1992], liés à l’origine à une complexité organisationnelle du milieu, se retrouvent cataloguées dans le champ des systèmes dynamiques complexes. J’ai travaillé sur des structures fractales pour la modélisation de structures de sols statiques (I.4 et I.6). J’aimerai bien savoir si elles peuvent être la signature d’un quelconque phénomène dynamique...

II.3 Modèles et mesures. Fiction et réalisme

Quelle que soit la façon de modéliser, il faut bien finalement juger de la validité ou de l’utilité des modèles développés...

Si un modèle calibré par des paramètres mesurés permet de prévoir l’avenir, même si c’est à court terme (en excluant de possibles dynamiques chaotiques à plus long terme ou des interactions avec d’autres événements imprévisibles), ce modèle est effectivement extrêmement intéressant. Mais ce n’est pas si souvent le cas. Comme je l’ai fait remarquer à plusieurs reprises dans mon mémoire, les modèles sont très souvent utilisés en méthode inverse ou semi-inverse. Ils permettent alors seulement d’estimer les paramètres d’entrée du modèle à partir d’événements passés. Si les caractéristiques du milieu représentées par ces paramètres ont un sens, le modèle aide au moins à la mesure de ces caractéristiques. Si ce sont des propriétés intrinsèques et constantes alors on peut tenter de les réinjecter comme paramètres du modèle dans des conditions autres que celles qui ont servi à la calibration, et le modèle est à nouveau utile en termes de prévision. Ce n’est pas toujours le cas non plus. C’est ainsi qu’une distribution de tailles de pores équivalents, estimée au moyen de la porosimétrie au mercure,

---

[28] un principe de parcimonie "Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem" (les entités ne devraient pas être multipliées sans nécessité) exprimé par un moine du moyen-âge dans un contexte de théorie religieuses et traduit maintes fois comme un principe scientifique de base [Thorburn, 1915], "Nous n'avons à accepter pas plus de causes des choses naturelles que celles qui sont à la fois vraies et suffisantes pour expliquer ces choses », [Newton, principia] ou sur la modélisation elle-même « Lorsque plusieurs modèles peuvent rendre compte des mêmes observations, le plus simple doit être préféré. Reste qu'il n'est pas toujours évident d'identifier le plus simple lorsque ces modèles rendent compte des observations avec différents degrés d'approximation http://franckalleron.free.fr/rasoiroccam.html

c'est-à-dire au moyen d'un modèle capillaire, ne permettra pas de calculer les écoulements d'un autre fluide si des phénomènes d'hystérésis [section1.4] interviennent et a fortiori si la géométrie du sol a varié entre temps, par exemple en présence d'eau.

Pour tester l'adéquation entre une réalité et modèle, on parle le plus souvent en termes de comparaison entre données observées et données simulées, selon par exemple un critère des moindres carrés pondéré ou pas (ex. I.2). Il arrive que l'on ne puisse effectuer cette comparaison que partiellement. C'est ainsi que ne disposant pas de champs de hauteurs d'eau expérimentaux sur les parcelles de ruissellement expérimentales pour le modèle d'écoulement Rivage (I.7), nous avons, de façon assez classique, comparé seulement les débits à l'exutoire de la parcelle. Je pense qu'un autre type de validation de modèles spatialisés pourrait être considéré, qui consiste à repérer les structures apparaissant dynamiquement, comme, dans le domaine ruissellement, les chemins de l'eau et son accumulation dans des dépressions. L'approche méthodologique que nous avons mise au point permet de suivre la dynamique de telles structures, en identifiant les groupes d'entités générés par les processus de flux particulaires, et en repérant leur création et leur devenir. La validation se situerait alors à un niveau intermédiaire entre un niveau microscopique - celui de la comparaison point par point des hauteurs d'eau -, et un niveau macroscopique -celui de la relation pluie/débit-, qui se trouve être aussi le niveau repérable visuellement ou sur des photographies.

Enfin, même sans être valide au sens prédictif, un modèle peut néanmoins s'avérer utile. C'est ainsi que même si les modèles fractals ne permettent pas de prévoir les caractéristiques hydriques des sols, leur utilisation apporte une notion fondamentale en terme de mesure. On sait depuis longtemps que la densité (et donc la porosité) d'un échantillon peut varier avec sa taille. Or on continue à donner les mesures de porosité sous forme d'un scalaire, un nombre, auquel on associe parfois un intervalle de confiance en tenant compte du principe des incertitudes de mesure. Si le sol était un parfait fractal de masse, sa porosité diminuerait en loi de puissance avec la taille de l'échantillon. La mesure n'est alors plus un simple nombre, ni un intervalle, c'est une fonction. Ceci reste vrai pour tout modèle multiéchelle. Le modèle introduit donc une conception fondamentalement différente de la mesure, que l'on peut malgré tout négliger lorsque l'on travaille toujours à la même résolution.

Les mesures sont des faits dont on ne peut pas faire grand chose sans modèle explicatif «...On fait de la science avec des faits comme une maison avec des pierres, mais une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison... » (La science et l'hypothèse, Poincaré, Flammarion, 1906, p.168.). Inversement, la simulation sur milieux virtuels fait toujours craindre de faire de la science sans données, des modèles jouets... Sauf si ces modèles permettent de définir des paramètres clefs, que l'on ne mesure pas encore, mais qui sont potentiellement mesurables. Le modèle peut alors être utile pour guider l'effort de mesure. Je pense notamment à l'indicateur de connectivité que l'on peut calculer par simulation sur le modèle de réseaux de pores extrait par analyse d'images en I.5. Sauf qu'il repose lui-même sur une autre mesure, elle-même pour l'instant trop coûteuse. Un modèle pourrait-il travailler sur des données que l'on ne pourra acquérir que plus tard ?

III. Perspectives de recherches futures

III.1 Prospective de l'unité de recherche GEODES

Développer le programme scientifique de l'Unité.

Le programme scientifique de l'UR [72] tel que défini en 2000 (voir résumé ci-dessous), bien qu'ayant évolué, n'a pas changé sur le fond, et il est toujours à réaliser.

L'unité GEODES a pour cadre la **recherche en mathématiques et informatique appliquée à la modélisation des systèmes complexes naturels ou sociaux**, dans le domaine émergent des " sciences de la complexité ". Elle se réfère à une démarche de modélisation qui postule que l'on peut extraire de la complexité apparente (due à l'hétérogénéité des milieux et à la diversité des processus interagissant) des règles simples d'organisation et de fonctionnement et donc des éléments structurants et des lois d'évolution permettant de mieux décrire, comprendre, contrôler et gérer la dynamique de tels systèmes.
La recherche est centrée sur la question des relations entre la dynamique des systèmes et leur organisation géométrique (ou encore la topologie de l'assemblage de leurs composants spatiaux, les différents niveaux d'organisation émergeant de données spatialisées) : en quoi l'**organisation géométrique** d'un système conditionne-t-elle son **comportement dynamique** ? de quelle façon, en retour, la dynamique d'un système en transforme-t-elle l'organisation? Nous avions montré dans la présentation détaillée du projet d'unité en quoi cette question de recherche apparaît tout à la fois pertinente, difficile et accessible (voir projet Geodes 1999, téléchargeable sur http://www.bondy.ird.fr/geodes/fichiers/txt-projet.html)
Les déterminismes réciproques entre organisation géométrique et dynamique, dans les systèmes environnementaux complexes que nous étudions, sont liés à des **processus de flux** (transferts, migration, transport, diffusion...) de " substances " diverses (fluide, matière, énergie, individus, poissons, parasites, informations...) dont le mouvement dans l'espace apparaît, d'une part largement contraint par des organisations géométriques et géographiques observables, d'autre part modifiant à court ou à long terme ces organisations.
Il s'agit donc de mettre en relation des types d'organisation et des types de dynamiques. Pour ce faire, nous recherchons un **formalisme commun** en privilégiant une **approche particulaire** des processus (ou simulation individus-centrée en biologie, ou multi-agents en informatique), adaptée à la prise en compte d'hétérogénéités structurales et fonctionnelles. Cette recherche s'appuie en grande part sur des **simulations** sur mondes virtuels, sous contrôle de mathématiques appropriées et avec une volonté affichée de construction et de validation à partir d'études de cas concrets (modèles de processus, hypothèses de fonctionnement, analyse de données spatiales et temporelles, observées et simulées, souvent en collaboration étroite avec d'autres UR).
Le projet se décline dans divers **champs thématiques** choisis en fonction des compétences des membres de l'équipe, des questions opérationnelles sur lesquelles ils travaillent, et pour leur exemplarité en ce qui concerne notre question recherche commune : Dynamique de l'eau et transports sur des surfaces hétérogènes ou dans des sols structurés – Flux parasitaires, dynamiques hôtes-vecteurs et épidémiologie des populations structurées – Champs océanographiques, aires de répartition, et dynamique spatiale des populations marines – Espaces habités, accès aux ressources, et mobilité humaine.
Nous réunissons ainsi, dans le cadre du projet GEODES, un **collectif de chercheurs, mathématiciens, informaticiens et thématiciens**, qui, autour d'une **problématique scientifique commune**, effectuent des travaux sur des opérations de recherche identifiées dans plusieurs champs clefs de l'IRD.

Le premier objectif est de réunir une équipe de mathématiciens et informaticiens appliqués, ou de « thématiciens » modélisateurs pour favoriser le partage des outils et l'ouverture intellectuelle permettant recul et circulation des concepts de modélisation d'un terrain disciplinaire à un autre ; cet objectif est assez clair, il est source de contraintes (participation aux séminaires multi-disciplinaires par exemple) et on peut craindre la dispersion, mais je continue à croire que l'existence de tels groupes de travail est positif en termes de création de modèles. Nous réussirons si chaque membre de l'équipe a une production scientifique de haut niveau, ce qui se traduit par des publications reconnues, quel que soit le sujet d'étude. Mon premier travail consistera donc à poursuivre l'administration d'un environnement propice à la

recherche individuelle, en particulier au niveau du cadre et des méthodes de travail des jeunes chercheurs ou étudiants. Et en ce qui concerne mon propre travail et celui des nouveaux étudiants que je pense encadrer, il s'agira de progresser sur mes recherches dans la lignée de mes travaux déjà effectués en modélisation hydropédologique.

Le deuxième objectif consiste à favoriser l'émergence d'un travail et d'une production collective. Il faut donc avoir un sujet d'étude commun. Dans le contexte d'une équipe multi-disciplinaire, c'est généralement l'objet d'étude qui est commun (une région géographique donnée, ou bien n'importe quelle question de gestion intégrée nécessitant la mise en œuvre de compétences complémentaires). Ce n'est pas le choix qui a été fait pour le projet Geodes, pour lequel j'ai parlé d'approche « transdisciplinaire ». Les objets d'étude y sont assez classiquement « disciplinaires » voire « pointus ». C'est au niveau de la recherche en modélisation que nous nous retrouvons, sur les deux plans suivants :

1) Méthodes et outils de modélisation : Il est prévu de publier un ouvrage collectif d'ici 2004, à partir de la liste des enseignements déjà effectués ou en cours sur des méthodes de modélisation, et en juxtaposant des exemples de travaux individuels dont on a extrait ce qui peut être générique. Nous avons aussi, en collaboration avec d'autres équipes, un projet de formation à la recherche (I.2), et un projet de développement d'outils de simulation (I.3).

2) Questions de recherche : Quels sont les liens entre organisation géométrique et dynamique des milieux ? Nous supposons l'existence de relations constitutives entre des types d'organisation et des types de dynamiques. Comment extraire de nos diverses expériences des exemples à partir desquels il sera possible de conforter cette thèse, et surtout d'en analyser les mécanismes et les conséquences ? Le résultat devrait être, au-delà des réponses spécifiques dans les domaines applicatifs, un ensemble de concepts et méthodes réutilisables dans la poursuite d'études par simulation pour guider la construction de modèles. Il s'agit donc pour chacun d'extraire de son domaine d'étude une problématique plus générale, et c'est ce que je présente en partie II pour ce qui me concerne. Au niveau de la direction de l'UR, il s'agit d'animer et de coordonner la recherche collective sur ces questions de représentations de l'espace et de dynamiques spatialisées.

Projet Formation Doctorale sur la science des modèles

Les principes et le fonctionnement de modèles préétablis, tout comme des outils et des méthodes de modélisation sont enseignés au sein de toute formation doctorale, traditionnellement disciplinaire, à l'université. Dans l'esprit du projet d'UR, mais dans le cadre d'un réseau de partenariat plus étendu, nous pensons qu'il serait tout à fait intéressant de développer une formation doctorale transversale en science des modèles, où la modélisation serait vue comme une discipline en soi. De même qu'il existe des formations en mathématiques appliquées, où, par opposition aux mathématiques pures, il ne s'agit pas de démontrer un nouveau théorème ou de trouver une méthode de résolution d'une équation générale jusqu'ici irrésolue, mais de formaliser et de résoudre un problème concret au moyen d'une analyse mathématique, de même on peut concevoir une formation où l'on s'intéresse à l'ensemble des méthodes qui permettent de traduire en abstractions mathématiques ou informatiques des phénomènes naturels, biologiques ou sociaux. De même qu'il est impossible au sein d'une formation doctorale de couvrir exhaustivement l'ensemble des sujets abordés au sein d'une discipline traditionnelle, de même une formation en modélisation ne pourra jamais couvrir un contenu par essence illimité, mais on peut envisager de transmettre un ensemble de techniques de bases et surtout un état d'esprit nourri d'exemples transdisciplinaires. Il n'existe pas dans le système universitaire français de telles formations généralistes où l'on enseignerait maths, stats, info, modèles physiques, modèles biologiques, modèles sociaux, voire philosophie de la modélisation et des sciences cognitives, et la création d'une formation de ce type est

certainement un sujet de débat. Notons que c'est différent aux USA par exemple [Schweber et Wächter, 2000] « The restructuring of universities with the establishement of new multidisciplinary doctoral programmes in interdisciplinary centres for non-linear dynamics or complex systems, the recognition of computer modelling as valid, accepted sub-disciplines in physics, chemistry, astrophysics, fluid dynamics, geology, biology, ecology, in engineering, the social sciences, medecine, library science and in other fields, are instanciations of the social and institutional changes taking place »

Quoi qu'il en soit, nous avons soumis à la Direction de la Recherche et à la Direction Générale de l'IRD un projet de ce type, en cette année 2002. C'est en collaboration avec des universités étrangères où l'UR a des partenaires en mathématiques appliquées (au sens fort du mot appliqué), à savoir les universités de Marrakech et du Cap, que nous souhaiterions monter un projet « d'Ecole Doctorale » franco-africaine et francophone-anglophone sur la science des modèles, avec une ouverture possible au Sénégal et au Cameroun. C'est donc un projet collectif particulièrement ambitieux qui structurerait fortement l'équipe Geodes tout en positionnant l'UR dans un dispositif IRD qui se doit de s'ouvrir sur le monde universitaire en l'amenant sur les terrains et les spécificités de l'institut (à savoir la collaboration avec « les pays du Sud », et la reconnaissance institutionnelle de structures de modélisation transversales telles que l'UR Geodes elle-même). C'est un projet atypique, intéressant et compliqué, qui a soulevé beaucoup d'enthousiasme en 2002 mais demande sans nul doute du temps pour mûrir et pour se discuter dans le cadre de la nouvelle réforme universitaire française (3-5-8) liée à l'ouverture européenne. Comme tout projet, il n'est pas sûr qu'il aboutisse, et en tout cas il risque fort d'évoluer par rapport à sa forme initiale, mais il fait partie à part entière de mes perspectives d'activités futures et figure à ce titre dans ce document. Il est dans la lignée du projet d'UR. Mais il dépasse le cadre scientifique de cette équipe et suppose la structuration d'un réseau d'enseignants-chercheurs associés. Il propose une vision de la recherche que nous ne sommes pas les seuls à avoir et qui mérite d'être défendue.

Projet de plate-forme de simulation de systèmes complexes

La simulation informatique est un outil privilégié de notre recherche. L'UR est membre du groupe de travail multi-organismes MIMOSA[29]. On s'y s'intéresse particulièrement aux développement d'outils de simulation suivant les principes multi-agents et aux méthodes de modélisation informatique des systèmes complexes naturels et sociaux, mais aussi à la simulation distribuée en général « The emergence of economical and powerful computers coupled with the ability to network a large number of computers, promises the ability to model and simulate complex, real-world systems, that are rapidly becoming commonplace in the society, successfully and with a high degree of fidelity... complex physical and natural processes that will increasingly constitute the challenging problems of the future » [Ghosh, 2002]. Ma participation personnelle est et sera de l'ordre de la coordination inter-organismes, et de la planification de la contribution de l'UR. Celle-ci est prévue pour l'instant surtout au niveau des modules de représentation des espaces virtuels (espaces bi et tridimensionnels continus ou discrétisés, espaces en réseaux), et pourrait inclure à ce titre des recherches en architecture informatique et en ingénierie logicielle dérivées du projet de recherche en modélisation de Geodes.

[29] initié par le Cirad à l'occasion de la réecriture la plate-forme de simulation Cormas [Bousquet et al., 1998],

III.2 Projet personnel de recherches

Mon projet de recherche proprement dit s'inscrit tout à fait dans le programme de l'UR : je voudrais pouvoir trouver des modèles paramétrables de structures spatiales pouvant servir de support à la modélisation de dynamiques environnementales.

Objectif

De façon générale, il s'agit de chercher à mieux comprendre voire prévoir différents types de fonctionnements dynamiques à partir d'une meilleure quantification des structures spatiales naturelles sur plusieurs niveaux d'organisation, via le développement de modèles de structures et d'une modélisation dynamique basée sur ces structures. [30]

L'application privilégiée concerne la reprise de mes travaux de thèse (I.4), c'est-à-dire la construction de modéles géométriques de structures de sol vues comme des milieux poreux multi-échelles, en construisant des structures virtuelles de « sols équivalents » servant de base à des expériences simulatoires pour la compréhension de mécanismes fondamentaux : flux d'eau, de solutés, et toute sorte de processus physico-chimiques ou biologiques que l'on suppose fortement liés au type de répartition des constituants solides et vides du sol et à l'évolution de cet assemblage (modification naturelle ou contrôlée de la structure). Il s'agit de reprendre cette recherche en se basant désormais sur le formalisme théorique que j'ai développé pour l'instant dans des études purement mathématiques (modèle PSF, voir I.6), en construisant des modèles tridimensionnels permettant de prendre en compte la connectivité de l'espace poral, et en trouvant comment contraindre réellement ce modèle par des données expérimentales, non seulement en termes de composition en constituants élémentaires, mais aussi en termes de configuration spatiale.

Souhaitant transposer cette démarche à d'autres échelles que celle de la structure « microscopique » des sols, et à d'autres domaines, en utilisant le formalisme commun du modèle PSF que j'ai conçu initialement pour le milieu sol, mais qui n'est autre qu'un modèle de percolation multi-échelles, mon but est de développer des concepts et des méthodes généralisables pour modéliser des dynamiques de flux ayant pour support des milieux naturels complexes

Méthodologie

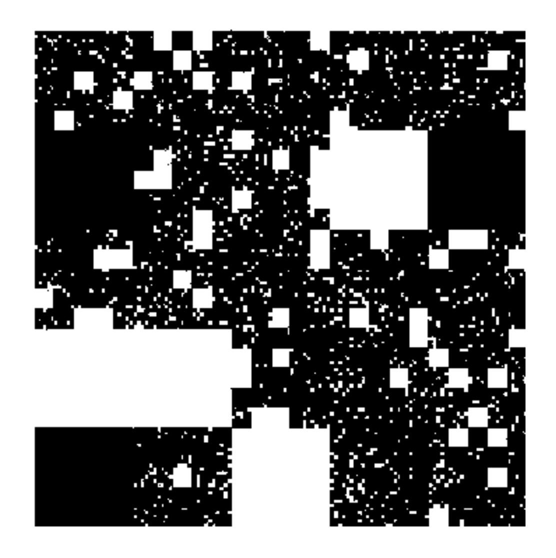
Modèles de structure et fonctionnement dynamique des sols

Construction de structures PSF tri-dimensionnelles

Il s'agit de construire un modèle de partition de l'espace en solides noirs / pores blancs / zones poreuses grises développées par itérations successives…

---

[30] Quand on a pris conscience de toute la difficulté de prévision à moyen ou long terme, même pour des systèmes physiques extrêmement simples (théorie du chaos [Lesne, 1995]) dès lors que la moindre non linéarité d'une dynamique engendre des évolutions totalement divergentes à la moindre incertitude sur les conditions initiales, on se demande quel espoir il reste en ce qui concerne la modélisation de processus en interaction dans des milieux naturels pour lesquelles la connaissance exacte du milieu lui-même est plus qu'approximative. On se résoud, pour beaucoup de systèmes physiques complexes, afin de cerner l'ensemble des évolutions probables, à abandonner l'idée de prévision exacte par pure modélisation analytique et à s'intéresser de plus près à des structures géométriques, telle que celle des trajectoires dans un espace des phases représentant abstraitement l'ensemble des états possibles. Dans le même état d'esprit il faudrait peut-être accroître nos moyens d'observation et de quantification de l'évolution des structures géométriques présentes dans les milieux naturels réels (« géométrisation du réel ») pour, à défaut de prévoir exactement, comprendre le court terme et mieux intuiter l'avenir. Mais quelles sont ces « structures fonctionnelles » qui permettraient de décrypter le monde réel?



Le modèle PSF. Des zones blanches (probabilité p) noires (probabilité s) et des zones grises (probabilité f=1-p-s) redécoupées en zones noires et blanches de taille réduite à chaque itération

Je me propose d'effectuer une représentation informatique d'un milieu poreux tri-dimensionnel qui soit d'office multi-échelles / multi-niveaux, où chaque élément gris à un niveau pointe vers un sous modèle qui lui-même pointe sur plusieurs sous-modèles sous forme d'un graphe hiérarchique (ce qui pourrait aller jusqu'à la distribution sur plusieurs ordinateurs). Etudier le tout consiste en une sorte de mise en œuvre des principes théoriques de renormalisation, dont on peut espérer que la réalisation concrète sous forme de simulations soit éclairante.

Calage sur des données de composition en constituants élémentaires,

La composition du milieu sol se décrit sous forme de distributions de taille des particules ou d'agrégats, de tailles de pores, de distribution des surfaces, de densité, de porosité sur plusieurs échelles emboîtées. Le calage du modèle PSF sur de telles données est d'ores et déjà possible dans le cas de structures régulières de type fractal, mais il faut le généraliser pour des distributions expérimentales quelconques en intégrant l'idée de mesure à chaque échelle associée à la construction hiérarchique de la structure modèle. On peut dès cette étape chercher à prévoir les propriétés hydrauliques par simulation. Mais je ne crois qu'à une réussite partielle de telles « prédictions », l'espérant pour quelques milieux dont les constituants sont répartis de façon aléatoire dans l'espace.

Intégration d'indicateurs de configuration géométrique[31] de l'assemblage relatif des vides et des solides.

C'est une étape nécessaire et difficile, que je développerai à partir de l'idée simple suivante. Lorsque que l'on simule, à partir d'un modèle hydrodynamique, une courbe de conductivité sur un réseau de pores extrait d'une image de milieu poreux (voir I.5), on calcule de fait une propriété structurale ; puisque calculée simplement en fonction d'une image de structure. Quelle que soit la « validité » du modèle hydrodynamique, cette courbe est de toute façon un indicateur de connectivité calculable automatiquement à partir de seules données structurales, et intégrant des informations à la fois sur les connections d'un réseau de pores et sur la taille des pores intervenant dans le fonctionnement hydrodynamique. Je nomme connectivité fonctionnelle un tel indicateur calculé par simulation sur une image donnée. Je chercherai à construire des modèles de structure du type (n, p, s…, facteur d'échelle D, connectivité fonctionnelle K, …) permettant non seulement de schématiser mais de paramétrer tout un

[31] On a déjà montré qu'un paramètre comme une dimension fractale, s'il peut être un descripteur fondamental d'un type de distribution ou de loi d'échelle pour une mesure de densité ou de surface, ne peut en aucun cas être un paramètre de configuration géométrique, puisque que des milieux peuvent être organisés très différemment et avoir la même dimension fractale

ensemble d'images tridimensionnelles réelles (une seule image n'est qu'une carte, i.e. une réalisation particulière effectuée à un instant donné, en un point donné, à une échelle donnée).

Je pense que, au-delà des tests qui seront effectués sur de telles images[32], ce sont à terme les propriétés de fonctionnement hydriques elles-mêmes, mesurées à l'équilibre pour différentes teneurs en eau (ce que je traduis par différentes « échelles », car étant associées à différentes tailles de pores) qui devraient permettre de déterminer, par méthode inverse, les traits essentiels de la structure que l'on cherche à modéliser. Il faudra mettre au point des méthodes d'optimisation ou d'apprentissage[33], dans un contexte multi-échelle, c'est-à-dire par niveaux successifs, pour trouver la structure d'un milieu à deux phases ayant une certaine conductivité associée à chaque niveau hiérarchique de la structure plus ou moins remplie de fluide.

Modélisation de dynamiques à partir d'un modèle de structure

Pour ce qui est de la dynamique de flux dans ces structures, les questions sont : qu'est-ce qu'une caractérisation d'un espace structuré apporte par opposition à une vision de milieu continu équivalent ? Un modèle conçu initialement pour un milieu continu homogène ne peut se baser a priori sur l'existence de structures naturelles, et l'on introduit donc a posteriori l'hétérogénéité sous forme d'une variabilité spatiale des paramètres du modèle, généralement lissée par des méthodes géostatistiques. Peut-on tenter de travailler directement à partir d'un modèle d'écoulement en prenant en compte la notion de structure par construction ? comment utiliser des modèles de structures, non seulement pour des typologies ou classifications descriptives, mais pour véritablement définir les processus dynamiques qu'elles subissent (déformation de structures sous contrainte hydrique) ou conditionnent (flux hydrodynamiques et transport). Ce sera l'objet de simulations exploratoires effectuées dans l'espoir de trouver de nouveaux formalismes pour décrire des phénomènes dynamiques à une échelle donnée sous forme de lois « physico-géométriques » définies par les propriétés des constituants élémentaires à une échelle plus fine. Illustrons ce principe de représentation de processus dynamiques en fonction d'un modèle explicite de structure : quand on représente des flux de fluide sur un réseau de pores, on utilise pour chaque pore une formule de type loi de Poiseuille, c'est-à-dire une formule intégrale des équations aux dérivées partielles de Navier-Stokes, et si le pore est un cylindre par exemple, les écoulements locaux sont décrits en fonction du diamètre du pore. On travaille alors en fonction de la taille et de la forme d'un objet au lieu de considérer des vitesses et pressions ponctuelles dans un espace continu dont les limites sont données par l'ensemble des points frontières de l'objet. C'est ce type d'approche, où une loi basée sur des équations physiciennes est traduite en fonction de paramètres géométriques que je nomme « physico-géométrique » - et qui couple un point de vue spatial et un point de vue dynamique-, que je pense approfondir. Pour simuler différents types d'écoulement ou de transport je pense ainsi simuler les processus de flux par des déplacements d'entités eau ou solutés dans des réseaux multi-échelles, dans la lignée des méthodes particulaires mises au point dans un contexte de ruissellement de surface, avec une vision simplifiée pour mettre délibérément l'accent sur la géométrie du milieu. Il faudra bien sûr, comparer, chaque fois que cela sera possible, les approches classiques par modélisation mathématique EDP et les approches simulatoires particulaires.

---

[32] De simples tests a priori car on pouurait imaginer avoir recours à une imagerie massive (images à différentes localisations, à différentes résolutions), mais même avec les progrès techniques qui sont à prévoir, le coût d'une telle opération restera sans doute plus élevé que la mesure des propriétés hydriques.

[33] Imaginons un cas simple, une structure composée d'une matrice imperméable traversée par un cylindre. Connaissant la conductivité totale du bloc, et la valeur de sa porosité, on peut supposer qu'à partir d'une méthode par essais successifs de positionnement des parties « pores », on arrive à retrouver la forme cylindrique à conduction optimale.

Je m'intéresserai aussi à la dynamique des structures elles-mêmes, question fondamentale pour les sols, qui les différencie de beaucoup d'autres milieux poreux, ne serait-ce que parce que leur volume et donc la géométrie du milieu varie avec la teneur en eau. C'est ce qui avait justifié une représentation duale des vides et des solides (native dans le modèle PSF) imposant des contraintes de cohérence sur ces variations de géométrie. Le fait de savoir désormais travailler sur des images de structures à géométrie quelconque va permettre de reprendre des études sur ce sujet. Cela ne règle par pour autant la difficile question d'une mise en équation des mécanismes physiques régissant les phénomènes de gonflement/retrait. C'est peut-être là que les conditions imposées par la géométrie d'un assemblage de solides pourraient passer du statut de contrainte à celui de moteur voire de loi, et que des modélisations multi-agents basées sur des interactions multiples entre particules d'eau et objets spatiaux dynamiques sont à envisager.

Mise en œuvre

Dans tous les cas, mon expérience passée souligne le couplage nécessaire de ces questions théoriques avec des expériences et des questionnements réels. Pour cela, c'est un partenariat que je dois développer (Silsoe Research Institute, INRA Laon, imagerie KU Leuven, autres UR de l'IRD, etc.), mais c'est ici un partenariat non institutionnel en soi, à poursuivre en fonction de ma propre question de recherche et de la façon dont elle recoupe celle de nombreux autres chercheurs.

Généraliser les applications d'un modèle de percolation multi-échelles

Le modèle PSF n'est autre qu'un modèle de percolation multi-échelles interprété en terme de modèle de structure poreuse et discuté selon la terminologie employée en science du sol, en fonction des données et des questions qui se posent dans ce domaine. La théorie de la percolation [de Gennes, 1976 ; Stauffer, 1985] a été appliquée à de nombreux autres domaines[34]. De la même façon, on peut supposer que le modèle PSF puisse se transposer à d'autres domaines que la science du sol et d'autres dynamiques que celle de l'eau, c'est-à-dire à d'autres thématiques où interviennent de multiples niveaux d'organisation spatiale à mettre en relation avec des dynamiques de flux.

Le modèle PSF n'est plus un modèle de percolation simple blanc/noir (vrai/faux, conducteur/isolant) mais un modèle blanc/noir/gris récursif. Cette constatation soulève des questions purement abstraites qui m'intéressent : comment se généralisent les résultats théoriques établis depuis longtemps pour la percolation simple ?[35]. Quel rapport entre les structures fractales d'un phénomène dynamique se déroulant sur un modèle de percolation simple (répartition des noirs et des blancs mono-échelle et purement aléatoire) et les structures fractales données a priori dans un modèle PSF autosimilaire ? que se passe-t-il pour les structures fortement organisées où le motif géométrique à chaque échelle est tout sauf aléatoire ?

Au-delà de la simple « curiosité intellectuelle », il y a surtout cet espoir de « découverte » liée à la transposition de concepts à d'autres thématiques (tout comme pour le projet Geodes de façon plus générale). Que signifient les résultats obtenus sur le modèle PSF en pensant à des

---

[34] mettant en évidence : 1) l'existence de seuils critiques de percolation ne dépendant que la topologie des réseaux et non pas de leur géométrie 2) d'exposants universels pour les phénomènes dynamiques agissant sur ces réseaux, ne dépendant que de la dimension euclidienne et non pas de leur spécificité 3) de structures fractales liées à ces phénomènes dynamique au moment du seuil de percolation, montrant l'action d'une multiplicité d'échelles au moment des transitions de phase

[35] cf. premiers travaux, non publiés, effectués avec N.Bird pour le modèle PSF, sur le calcul d'un seuil de percolation par renormalisation (mathématique pour la connectivité pure, simulatoire pour la conductivité ou connectivité fonctionnelle)

distributions de tailles de pores ou de solides, de porosité et de densité, etc., quand on les traduit en d'autres termes dans d'autres domaines ? Il s'agira alors, d'une part de reprendre les exemples « célèbres » de la théorie de la percolation : milieux isolants / conducteurs et flux électriques, milieux arbres / clairière et dynamique des feux de forêts, milieux infectés / sains et dynamiques épidémiologiques, îles submergées / émergées et chemins disponibles, d'autre part de chercher d'autres exemples dans le cadre des quatre axes privilégiés par l'UR Geodes (dynamiques de populations urbaines, dynamiques épidémiologiques, dynamiques de populations marines, dynamiques hydropédologiques).

J'aimerais trouver des correspondances et des aspects génériques, non seulement sur des représentations de structures spatiales, mais sur la modélisation de dynamique de flux par propagation dans l'espace, où seules les lois locales de propagation dépendraient du domaine d'application. J'introduirai le même type de recherche que pour les structures de sols : peut-on caractériser des structures aléatoires multi-échelles par leur simple composition (et des critères généraux du type de maillage ou coordinance) et prévoir ainsi leur fonctionnement ? Doit-on au contraire caractériser des structures fortement organisées par des indicateurs fonctionnels calculés par simulation de dynamiques ciblées, à la fois liées à l'organisation spatiale et au fonctionnement auquel on s'intéresse ? quels liens constitutifs entre organisation spatiale et dynamique de flux[36] ?

Applications

Les applications, si tout va bien, rejoindront les objectifs.

Les produits attendus sont :

- un outil de génération de structures de sols virtuelles « équivalentes » à la réalité sur lesquelles poursuivre, en collaboration avec d'autres chercheurs, des explorations de mécanismes fondamentaux dans le domaine du fonctionnement des sols.

- une contribution significative à la recherche d'indicateurs de structures, pertinents pour un type de dynamique donné, et mesurables, utiles en soi pour participer aux analyses typologiques des milieux naturels, et plus précisément des structures poreuses de sols, mais pourquoi pas aussi pour des structures topographiques dans un contexte plus ou moins voisin.

- des avancées dans la recherche de liens entre des paramètres d'organisation spatiale calculés à partir de fonctionnements simples et des paramètres de dynamiques plus complexes liées à ces organisations

- une utilisation du modèle PSF pour servir de base à des simulations de dynamiques spatialisées dans des milieux multi-échelles, en tant que grille de lecture systématique permettant l'approfondissement de toute une classe de questions et le développement de concepts de modélisation généralisables.

[36] Une différence forte entre un modèle de percolation simple et un modèle de percolation multi-échelle, c'est que les zones contributives à l'établissement de chemins pour les flux modélisés ne sont pas seulement les zones disons blanches (ou noires), mais aussi les zones grises lorsqu'elles ont elles-mêmes dépassé le seuil de percolation. C'est donc toute une distribution de taille de zones blanches qui contribuent, jusqu'aux plus petites, et si les propriétés de conduction dépendent de la taille (exemples pores remplis de fluide ou pas), ce n'est plus la seule composition du milieu qui intervient (plus ou moins grande proportion de zones blanches conductrices par définition), mais sa composition et son état vis-à-vis d'un phénomène dynamique (plus ou moins grande proportion de zones blanches en état de conduction).

IV Conclusion générale

Une dernière grille de lecture de mes travaux montre que j'ai eu l'objectif constant de poursuivre, tout en composant avec les besoins conjoncturels et les fluctuations des politiques scientifiques, une activité de recherche "personnelle" cohérente qui se tisse autour d'un fil conducteur. Dans un cadre de recherche en hydrodynamique des sols, ce fil conducteur a pour origine mon travail de thèse (Structure Géométrique et fonctionnement hydrique des sols : simulations exploratoires). Il peut s'exprimer ainsi : comment modéliser, mathématiser, simuler, l'organisation de structures naturelles complexes de façon suffisamment formelle pour y reconnaître ou en déduire des schémas explicatifs de leur fonctionnement, quand l'analyse des dynamiques prend appui sur cette représentation et sur des hypothèses mécanistes quant à la nature des processus sous-jacents? Comment tenir compte des modifications dynamiques de ces structures dans un modèle de fonctionnement, et réciproquement comment comprendre voire prévoir ces évolutions ? Il se retrouve dans mon axe principal de recherche (modélisation de structure de sols à l'échelle microscopique et caractérisation hydrodynamique) mais mon approche s'est aussi étendue à d'autres échelles (modélisation des processus d'infiltration et de ruissellement dans des milieux hétérogènes). Il est sous-jacent à la plupart des travaux d'étudiants que j'ai encadrés sur des questions de modélisation en informatique ou en hydrologie. Il se retrouve enfin dans le programme de l'unité de recherche Geodes que je dirige actuellement à l'IRD, en travaillant en collaboration avec d'autres chercheurs qui apportent des questions comparables, des éclairages différents, et des méthodes transposables dans un cadre élargi à d'autres thématiques de recherche.

En ce qui concerne mes perspectives futures, je propose simultanément :

- de conduire simultanément des travaux de recherches personnelles pour contribuer au développement de connaissances dans le domaine de la recherche de liens entre des types de structures géométriques et des types de dynamiques. Pour ce faire je me concentrerai autant que faire se peut sur une approche particulière de percolation multi-échelles que j'ai déjà commencé à appliquer en science du sol et que je pense généralisable.

- de participer au développement de tout un courant de modélisation informatique et informatique de systèmes naturels et sociaux en terme de champ de recherche reconnu, en partenariat avec tout un réseau de chercheurs des institutions de recherche et universités du Nord et du Sud

V. Références bibliographiques

Bartoli,F., Bird, N., Gomendy, V., and Vivier H., 1999, The relationship between silty soil structures and their mercury porosimetry curve counterparts : fractals and percolation. *European Journal of Soil Science*, 50, 9.

Baveye P., Parlange J.Y., and Stewart B. A. Eds, *Fractals in soil science*, Advances in Soil Science, CRC Press 1998.

Baveye, P. and Boast, C.W. Concepts of “fractals” in soil science : demixing apples and oranges, 1998, *Soil Science Society of America Journal* 62, 1469.

Bergé P., Y.Pomeau, C.Vidal, 1984. *L’ordre dans le chaos*, Ed.Hermann.

Blunt, M., M.J. King, et H.Scher, 1992. Simulation and theory of two-phase flow in porous media, *Phys.Rev.A., 46(12), pp7680-7699*

Boivin P. (ed.), I. Dia, I. (ed.), A.Lericollais(ed.), J.C.Poussin (ed.), C.Santoir(ed.)et S.M. Seck, (ed.), 1995, Nianga, laboratoire de l’agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal, *Ouvrage coll. Etudes et thèses Orstom, 573pp.*

Boon J.P., Ed. 1992. Lattice gas automata: theory, implementation, simulation. *Journal of statistical physics. Plenum Press.*

Bousquet F., C. Cambier, C. Mullon, P. Morand, 1993. Simulating the interaction between a society and a renewable resource. Journal of Biological Systems 1(1), pp. 199-214.

Bousquet, F., Bakam, I., Proton, H. et Le Page, C., 1998. Cormas : common-pool resources and multi-agent Systems. Lecture Notes in Artificial Intelligence 1416: 826-838

Bousquet, F., O. Barreteau, P. Aquino (d'), M. Etienne, S. Boissau, S. Aubert, C. Le Page, D. Babin and J.-C. Castella,2002. Multi-agent systems and role games : collective learning processes for ecosystem management. *Complexity and Ecosystem Management: The Theory and Practice of Multi-agent Approaches. M. Janssen, Edward Elgar Publisher*s

Braudeau E., 1988, Essai de caractérisation quantitative de l’état structural d’un sol basé sur l’étude de la courbe de retrait, *C.R.Acad.Sci.II, 307(19), pp.1933-1936*

Braudeau E., J.M.Costantini, G.Bellier, et H. Colleuille, 1999, New device and method for soil shrinkage curve measurement and characterization, *Soil Sci. Am. J. 63 (3): 525-535*

Brooks, R.H. and Corey, A.T., 1964. Hydraulic Properties of Porous Media. *Hydrology Paper 3, Colorado State University, Fort Collins, CO*.

Bruckler L., P.Bertuzzi, R.Angulo-Jaramillo, S.Ruy, 2002, Testing an infiltration method for estimating soil hydraulic properties in the laboratory, *Soil Science Society of America journal. vol. 66, no 2, pp. 384 – 395.*

Cacas, M.C., E.Ledoux,G.de Marsily, A.Barbreau, E.Durand, B.Feuga, et P.Peaucedorf, 1990. Moddeling fracture flow with discrete fracture network : calibration and validation I.The flow model, II, the transport model, *Water Res. Research, 28 (1) 479-489*.

Cardon A, 2000, *Conscience artificielle et systËmes adaptatifs*, Editions Eyrolles, Paris

Cousin I, P.Levitz, A.Bruand, 1996, Three-dimensional analysis of a loamy-clay soil using pore and solid chord distributions, *European J. of Soil Sci., 47 (4): 439-452*

Crave A. et P. Davy, 2001. A stochastic "precipiton" model for simulating erosion / sedimentation dynamics, *Computers et Geosciences, 27 (7): 815-827*

Crawford, J.W., Sleeman, B.D., Young I.M., 1993 On the relation between number-size distribution and the fractal dimension of aggregates. *Journal of Soil Science, 44*, 555, 1993.

Daniels M., 2000, An open framework for agent-based modeling, Swarm Development Group, Santa Fe Institute. LosAlamos National Labshhtp://www.swarm.org/intro-papers.html

Darboux F, Davy P, Gascuel-Odoux C, et C.Huang, 2002. Evolution of soil surface roughness and flowpath connectivity in overland flow experiments, *Catena 46 (2-3): 125-139*

De Angelis, D.L., L.J. Gross, Eds, 1992. *Individal based models and approaches in ecology*. Chapman and Hall.

De Marsily, 1981, *Hydrogéologie quantitative, Ed.Masson*

Delahaye J.P., 1994. *Information, complexité et hasard. Ed. Hermes, Paris*.

Delay F., H. Housset-Resche, G. Porel, G. de Marsily, 1996. Transport in 2-D saturated porous medium: a new method for particle tracking. *Mathematical geology, 28(1), pp. 45-71.*

Delerue J.F., 2001, Segmentation 3D, application à l'extraction de réseaux de pores et à la caractérisation hydrodynamique des sols. *Thèse Université d'Orsay,*

Delerue J.F., S.V. Lomov, R. Parnas, I. Verpoest and M. Wevers, 2002,. Pore network modelling of permeability for textile reinforcements. *Journal of Polymer Engineering & Science(sous presse)*

Dreuzy de JR, P.Davy et O.Bour, 2001, Hydraulic properties of two-dimensional random fracture networks following a power law length distribution 1. Effective connectivity, *Water Res. Research,37 (8): 2065-2078*

Drogoul A., B. Corbara, S. Lalande, 1995. Manta: new experimental results on the emergence of (artificial) ant societes, *The computer simulation of social life, UCL Press*.

Drogoul A., 2001, Systèmes multi-agents situés, HdR Université Paris 6.

Dubois M., 1984. Attracteurs étranges et dimension fractale, *Images de la physique, p.92*

Ducourneau R., J. Euzenat, G. Masini, A. Napoli, 1998. Langages et modèles à objets. Etat des recherches et perspectives, *Collection dicatique, Ed. INRIA*

Estèves M., X.Faucher, S.Galle et M.Vauclin, 2000, Overland flow and infiltration modelling for small plots during unsteady rain : numerical results versus observed values. *Journal of hydrology, 228, pp.265-282.*

Even P. et S. Nicolaïdis, 1984, Le métabolisme de fond : définition et dispositif de sa mesure. *C.R. Acad. Sci. 298(9) pp261-266.*

Fatt, I., 1956, The network model of porous media, I, II, III. *Transactions AIME, 207, pp.144-177.*

Favis –Mortlock D., 1998, A self-organizing dynamic systems approach to the simulation of rill initiation and developpement on hillslopes. *Computers & Geosciences 24(4) pp.353-372.*

Ferber J., 1994. Modélisation par agents: un outil d'aide à la simulation de phénomènes complexes, *lettre de l'environnement du CNRS*

Ferber, J., 1995. Les Systèmes Multi-agents. Vers une intelligence collective. *Ed. Interéditions, Paris.*

Fianyo E., 2001, Couplage de modèles à l'aide d'agents : le système OSIRIS. *Thèse Université Paris 9.*

Frontier S., 1997. Préface de l'ouvrage: P. Coquillard, D. Hill, Modélisation et simulation des écosystèmes. *Ed. Masson.*

GarciaSanchez L, DiPietro L, Germann PF, 1996, Lattice-gas approach to surface runoff after rain, *European J. of Soil Sci. 47 (4): 453-462.*

Garnier P, 1996. Détermination des caractéristiques hydrodynamiques de sols déformables par la méthode inverse, *Thèse Université Nancy, France, 144p.*

Garnier P., Rieu M., Boivin P., Vauclin M., Baveye P., 1997. Determining the hydraulic properties of a swelling soil from a transient evaporation experiment in Soil Science Society *American Journal 61(6), 1555-1563.*

Gennes P.G. de, 1976. La percolation: un concept unificateur. *La recherche 72, pp. 919-927.*

Gennes, P.G., de, 1985. Partial filling of a fractal structure by a wetting fluid. *In : Physics of disordered materials, Eds. Adler et al., Ed.Plenum New York,* 227.

Ghosh S, 2002, The role of modeling and asynchronous distributed simulation in analyzing complex systems of the future, *Information systems frontiers, 4 (2): 161-177*

Gouyet J.F., 1992. Physique et structures fractales, *Ed. Masson.*

Granville V., M. Krivanek et JP Rasson, 1994, Simulated annealing : a proof of convergence, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol.16, no 6, pp.652-656.*

Green W. et G. Ampt, 1911, Studies on soil physics: 1. The flow of air and water through soils. *Journal of agricultural science, 4:1-24.*

Haverkamp R., Vauclin M., Touma J., Wierenga P.J., Vachaud G., 1977. A comparison of numerical simulation models for one dimensional infiltration, *Soil Science Society American Journal 41(2), 285-294.*

Indelman P., 2002, On mathematical models of average flow in heterogeneous formations, *Transport in porous media. vol. 48, no 2, pp. 209 - 224*

Jean M.R[37], 1997, De la notion d'émergence dans les systèmes multi-agents. *Actes des journées d'Intelligence Artificielle et Systèmes Multi-agents, JFIADSMA'97, Ed.Hermès,*

Kalman R.E., 1960. A new approach to linear filtering and predictions problems. *J.Basic Eng. 82, pp. 35-45.*

Kasteel R., H.J.Vogel, et K.Roth, 2000, From local hydraulic properties to effective transport in soil, *European journal of soil science, vol. 51, no 1, pp. 81 - 91*

Katz A.J., et A.H.Thompson, 1985. Fractal sandstones pores : implication for conductivity and pore formation. *Phys. Rev. Lett. 54 (12) pp 1325-1328.*

Kiss G., 1996, Agent dynamics, in *Foundations of distributed artificial intelligence, G.M.P. O'Hare and N.R. Jennings. Eds. John Wiley & Sons, pp. 247-267.*

Langlois A., M. Phipps, 1997. *Automates cellulaires, applications à la simulation urbaine.* Ed. Hermes. Paris.

Langton C., 1994. Ed, *Artificial Life* 3, Addison Wesley.

Leonard J., 2000, Interaction entre le ruissellement et les macropores créés par les termites dans le cas d'un sol encroûté au Sahel. Etude expérimentale et modélisation, *Thèse Université Paris 6*

---

[37] M.R.Jean, Nom collectif, par référence à « émergent »

Lesne A., 1995. Méthodes de renormalisation, phénomènes critiques, chaos, fractales, *Ed. Eyrolles.*

Mandelbrot, B.B, 1983, The fractal geometry of nature, *Ed.Tech.et Doc.Lavoisier, Paris.*

May, R.M., 1977. Simple mathematical models with very complex dynamics. *Nature, 261, pp. 459-467.*

Morita M., Ben Chie Y., 2002, Modeling of conjunctive two-dimensional surface-three-dimensional subsurface flows, *Journal of hydraulic engineering, 2002, vol. 128, no 2, pp. 184 - 200*

Neimark, A.V., 1989. Multiscale percolation systems. *Soviet Physics-JETP*, 69, 786

Newman MEJ, DJ Watts, 1999, Scaling and percolation in the small-world network model, *Physical-review-E 60 (6) Part B : 7332-7342*

Nicolis G., I. Prigogine, 1989. Exploring complexity. *W.H. Freeman & Co. NewYork.*

Pachepsky Ya. A., Crawford J.W., and Rawls J.W. Eds, 2000, *Fractals in soil science*, Developments in soil science 27, Elsevier.

Pascual M, Roy M, Franc A, 2002, Simple temporal models for ecological systems with complex spatial patterns, *Ecology letters, 5 (3): 412-419*

Pavé A., 1994. *Modélisation en biologie et en écol*ogie, *Ed. Aleas, Lyon. p.361.*

Perfect E.,N.B.Laughin,B.D.Kay, et G.C.Topp, 1996. An improved fractal equation for the soil water retention curve WRR 32(2), *Water Resources Research, Vol.34, no 4, pp.931-932*

Poncet Y., C. Mullon, M. Kuper. 2002. Organisation spatiale d'un écosystème exploité, description des choix spatiaux dans la modélisation intégrée du delta intérieur du Niger au Mali. *L'Espace géographique. 31-2 : 118-130.*

Ramzi A., O.Arino et al., 2001. Modeling and numerical simulations of larval migration of the sole (Solea solea (L.)) of the Bay of Biscay. *Oceanologica Acta, vol.24(2), pp. 101-24.*

Richards L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous medium *Physics 1, 318-333.*

Rieu M. & Sposito G. 1991. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: I Theory. II Applications,Soil Science Society of America Journal, 55, 1231-1244.

Saiyouri N., P.Y. Hicher, D.Tessier, 2000, Microstructural approach and transfer water modelling in highly compacted unsaturated swelling clays, *Mechanics of cohesive-frictional materials, 5 (1): 41-60*

Solomon S., G. Weisbuch , L. de Arcangelis, N. Jan, et D. Stauffer, 2000. Social Percolation Models, *Physica A 277, 239*

Santos L, P.C. Philippi, M.C Damiani, C.P., Fernandes, 2002, Using three-dimensional reconstructed microstructures for predicting intrinsic permeability of reservoir rocks based on a Boolean lattice gas method, *J.of Petroleum science and engineering, 35 (1-2): 109-124*

Schweber S. et M.Wachter, 2000, Complex systems, modelling and simulation, *Studies in history and philosophy of modern physics, 31B (4) pp. 583-609*

Schweitzer F, 1998, Modelling Migration and Economic Agglomeration with Active Brownian Particles, *Adv Complex Systems, 1, pp. 11-37.*

Servat D., 2000, Modélisation de dynamiques de flux par agents. Application aux processus de ruissellement, infiltration et érosion, *Thèse Université Paris 6*

Shipman A.J., 2002. Variabilité à petite échelle du fonctionnement hydrodynamique d'un versant prairial : étude expérimentale et modélisation, *Thèse INPG Grenoble*

Simunek J., van Genuchten M.Th., Sejna M., 1999. Using the HYDRUS-1D and HYDRUS-2D codes for estimating unsaturated soil hydraulic and solute. *In : Proceedings of the International Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media, Riverside, California, October 22-24, 1997, van Genuchten M.Th., Leij F.J. and Wu L. Eds, University of California Ed., pp.1523-1536.*

Sok RM, Knackstedt MA, Sheppard AP, Pinczewski WV, Lindquist WB, Venkatarangan A, Paterson L, 2002, Direct and stochastic generation of network models from tomographic images; Effect of topology on residual saturations, *Transport in porous media,46 (2-3): 345-372*

Stauffer F., 1985. Introduction to percolation theory. *Ed. Taylor & Francis.*

Stein D.L., 1989, Disordered systems: mostly spin glasses, Lectures in the Sciences of Complexity, Addison-Wesley Longman, pp. 301-354.

Teles V ; 1999, Construction de réservoirs aquifères alluviaux par modèle génétique de mise en place des alluvions, *Thèse Université Paris 6*

Thorburn W.M., 1915 "Occam's razor," *Mind, 24, pp. 287-288, 1915.*

Touma J., 1987, Modèle pour tester la représentativité des caractéristiques hydrodynamiques d'un sol non saturé déterminées in-situ, *rap. ORSTOM, 26 p, cote F A24686/2 base IRD Horizon*

Treuil J.P., C.Mullon, 1997. Expérimentation sur Mondes artificiels. Pour une réflexion méthodologique. *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement, Editions Elsevier*

Tyler, S.W. and Wheatcraft, S.W., 1990. Fractal processes in soil water retention, *Water Resources Research*, 26, 1045.

Tyler S.W. and S.W Wheatcraft, 1992. Fractal scaling of soil particle-size distributions : analysis and limitations. *Soil Sci. Soc. Am. J.56, pp.362-369.*

Vogel H.J. et K.Roth, 2001, Quantitative morphology and network representation of soil pore, 2001, *Advances in water resources, vol. 24, no 3-4, pp. 233 - 242*

Weisbuch G.,1989, Dynamique des systèmes complexes: une introduction aux réseaux d'automates, collection Savoirs Actuels, InterEditions/Editions du CNRS. Paris.

Werner B.T., 1999. Complexity in natural landforms patterns, *Science, special issue on complex systems, Vol 284, pp. 102-104.*

Wilson AG, 2002, Complex spatial systems: Challenges for modellers, *Mathematical and computer modelling, 36 (3): 379-387*

Winsberg E,2001, Simulations, models, and theories: Complex physical systems and their representations, *Philosophy of science, 68 (3): S442-S454*

Withaker S, 1986. Flow in porous media, a theoretical derivation of Darcy's law. *Transport in porous media. pp. 3-25.*

Yoon HY, Koshizuka S, Oka Y, 1999, A particle-gridless hybrid method for incompressible flows, *International journal for numerical methos in fluids, 30 (4): 407-424*

Zhu Y, P.J.Fox et J.P.Morris, 1997. Smoothed particle hydrodynamic model for flow through porous media. Yuan Ed., *Computer methods and advances in geomechanics, pp. 1041-1046.*

TROISIEME PARTIE: PUBLICATIONS CHOISIES

I.1Modélisation et filtrage de données en physiologie

I.2 Simulation numérique en hydrodynamique des sols non saturés

I.3 Modélisation EDP des transferts hydriques en sol déformable

I.4 Structures de sols virtuelles et simulations hydrodynamiques exploratoires

I.5 Modélisation d'images tridimensionnelles de sols sous forme de réseaux de pores

I.6 Le modèle PSF : une formalisation mathématique de structures poreuses multi-échelles

I.7 Modélisation EDP du ruissellement et interaction avec de l'inflitration dans des macropores

I.8 Le projet RIVAGE : modélisation multi-agent de processus hydrologiques de surface

I.9 Simulation de la genèse d'une plaine alluviale : structure et hydrodynamique d'un aquifère

I.10 Simulation informatique multidisciplinaire de dynamiques spatialisées